



**JOEL SILVA FONTES APLICAÇÃO DA CORRELAÇÃO DIGITAL DE
IMAGEM AO ESTUDO DA FRATURA EM MODO I DE
LIGAÇÕES COLADAS**



JOEL SILVA FONTES

**APLICAÇÃO DA CORRELAÇÃO DIGITAL DE IMAGEM
AO ESTUDO DA FRATURA EM MODO I DE LIGAÇÕES
COLADAS**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação científica do Doutor Alfredo Manuel Balacó de Moraes e Doutor António Manuel de Bastos Pereira, Professor Associado e Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro.

Apoio financeiro dos projetos
UID/EMS/00481/2013-FCT e CENTRO-
01-0145-FEDER-022083

o júri

presidente

Prof. Doutor Vítor Manuel Ferreira dos Santos
Professor Associado da Universidade de Aveiro

arguente

Prof. Doutor Luís Manuel Pires Martins de Abreu
Professor Adjunto da ESTGA

orientador

Prof. Doutor Alfredo Manuel Balacó de Moraes
Professor Associado da Universidade de Aveiro

agradecimentos

ao meu orientador e co-orientador, Professores Doutores Alfredo Balacó de Moraes e António de Bastos Pereira que, sempre com boa disposição, tiveram disponibilidade para me ajudar e apoiar neste tempo todo. Agradeço também pelos desafios impostos e sabedoria transmitidas que ajudaram ao meu enriquecimento tanto como futuro engenheiro como pessoal.

aos engenheiros Festas e Ricardo Beja pelos seus conselhos e por nunca me terem negado ajuda. Também à professora Gabriela Vincze pelo seu auxílio.

a todos os colegas, professores e funcionários desta universidade que de alguma forma desempenharam um papel positivo nesta fase da minha vida.

à família e amigos por tornarem tudo mais fácil.

à Inês por tudo.

palavras-chave

mecânica da fratura; modo I; ensaio double cantilever beam (DCB); ligações coladas; correlação digital de imagem; sistema ARAMIS; extensões de flexão; monitorização da propagação da fenda.

resumo

As ligações coladas estão a ter utilização crescente em aplicações estruturais devido às vantagens que têm relativamente a formas tradicionais de ligação, como as ligações aparafusadas e rebitadas. Todavia, subsistem incertezas acerca do comportamento das ligações coladas, que por isso continuam a ser objeto de vários trabalhos de investigação.

Esta dissertação incidiu sobre o comportamento à fratura em modo I de ligações de substratos de aço colados com adesivo epóxico. O objetivo principal foi desenvolver e avaliar uma nova forma de aplicação da correlação digital de imagem à monitorização da propagação da fenda no ensaio Double Cantilever Beam (DCB). A técnica proposta baseia-se na medição das extensões nos substratos e, potencialmente, permite a caracterização mais completa e rigorosa do comportamento à fratura.

Apesar de coerentes, os resultados obtidos foram afetados pelo ruído nas medições da correlação digital de imagem. São, portanto, necessários melhoramentos na técnica proposta, alguns dos quais foram já identificados e deverão reduzir significativamente os referidos níveis de ruído.

keywords

fracture mechanics; mode I; double cantilever beam (DCB) test; adhesive joints; digital image correlation; ARAMIS system; bending strains; crack propagation monitoring.

abstract

Adhesive joints are finding increasing structural applications, because of their advantages over traditional joining methods e.g. bolted and riveted joints. However, uncertainties remain about the behavior of adhesive joints, which thus continue to be the subject of considerable research.

This dissertation studied the mode I fracture behavior of steel substrates bonded by an epoxy adhesive. The main objective was to develop and assess a new form of applying the digital image correlation to crack propagation monitoring in Double Cantilever Beam (DCB) tests. The technique proposed is based on substrate strain measurements and has the potential of enabling a more complete and accurate characterization of the fracture behavior.

Despite being coherent, the results obtained were affected by noise levels in digital image correlation measurements. Improvements are therefore needed to the technique proposed, some of which were already identified and should reduce significantly the aforementioned noise.

Conteúdo

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS PRINCIPAIS	I
ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	III
1. ENQUADRAMENTO E ESTADO DA ARTE	1
1.1. CARACTERÍSTICAS GERAIS DAS JUNTAS COLADAS	1
1.2. FRATURA DE JUNTAS COLADAS	5
1.3. MÉTODOS PARA A DETERMINAÇÃO DO <i>GIC</i>	7
1.4. MODELOS DE ZONA COESIVA	10
1.5. ESTUDOS RECENTES	12
1.6. CORRELAÇÃO DIGITAL DE IMAGEM	14
1.7. IDEIA BASE A DESENVOLVER	17
2. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS	19
2.1. PREPARAÇÃO DOS PROVETES DCB	19
2.2. PREPARAÇÃO DOS ENSAIOS	25
2.3. PREPARAÇÃO DO SISTEMA ARAMIS	27
2.4. ENSAIOS DCB	31
3. RESULTADOS EXPERIMENTAIS	37
4. CONCLUSÕES	47
REFERÊNCIAS	49
ANEXOS	55

Lista de Símbolos e Abreviaturas Principais

CDI	Correlação digital de imagem
CEF	Calibração Experimental da Flexibilidade
CTOD	<i>Crack Tip Opening Displacement</i>
DCB	Double Cantilever Beam
DEM	Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro
MFE	Método da Fenda Efetiva
TVC	Teoria das Vigas Corrigida
VBA	Visual Basic para Aplicações
ZPF	Zona de Processo de Fratura
a	Comprimento da fenda
a_e	Comprimento de fenda efetivo
B	Largura do provete
C	Flexibilidade (<i>compliance</i>)
E_s	Módulo de flexão do aderente
G_{IC}	Taxa crítica de libertação de energia de fratura em modo I
h	Espessura do aderente
P	Carga aplicada
δ_c	Deslocamento relativo na direção normal à camada de adesivo
Δ	Fator de correção do comprimento de fenda
σ ou T	Tensão normal coesiva ou “tração”

Estrutura da Dissertação

A dissertação encontra-se dividida em 4 capítulos.

Capítulo 1: é feita uma apresentação do enquadramento do trabalho desenvolvido e uma revisão do estado da arte. Também a motivação e objetivos que estiveram na base do trabalho são aqui referidos;

Capítulo 3: descreve em pormenor os procedimentos experimentais, desde a preparação dos provetes aos procedimentos aplicados no sistema de correlação digital de imagem e na máquina de ensaios;

Capítulo 3: são apresentados e discutidos os resultados experimentais;

Capítulo 4: encontram-se as conclusões da presente dissertação e objetivos alcançados, assim como propostas para trabalhos futuros.

1. Enquadramento e Estado da Arte

1.1. *Características gerais das juntas coladas*

As ligações coladas, têm vindo a ser cada vez mais usadas em aplicações estruturais como alternativa às ligações aparafusadas, rebitadas e soldadas. Isto deve-se às muitas vantagens, tais como [1], [2]:

- Elevada resistência mecânica, se a junta for bem concebida;
- Redução de peso e do número de peças em relação às ligações aparafusadas e rebitadas;
- Minimização de problemas de corrosão, sobretudo nas ligações de materiais diferentes;
- Capacidade de vedação e isolamento térmico;
- Amortecimento de vibrações, devido ao comportamento viscoelástico das colas;
- Boa resistência à fadiga, dada a ausência de furos e da concentração de tensões associada;
- Boa aparência estética;
- Baixos custos associados.

As ligações coladas têm um vasto campo de aplicações, que vai desde a indústria das embalagens até à indústria aeronáutica. O fabrico de componentes colados para aeronaves, apesar de ter mais de 90 anos, aumentou muito a sua popularidade nas últimas três décadas, sendo atualmente um assunto importante em vários estudos sobre o envelhecimento de aeronaves [3]. As utilizações militares de ligações coladas começaram pouco depois de aparecer a aviação e foram logo usadas na primeira guerra mundial. Avanços significativos, como o uso de resinas fenólicas em madeira e juntas de madeira com metal, ocorreram durante a segunda guerra mundial em aeronaves como a Mosquito da RAF (*Royal Air Force*) [4]. Com base nestes avanços, os engenheiros da *Fokker* começaram a incluir componentes metálicos estruturais nas séries F-27 e F-28 no final da década de 1940 e no início da década de 1950 [5], [6]. O uso militar de estruturas metálicas coladas ocorreu quase ao mesmo tempo do aparecimento do *Convair B-58 Hustler* da USAF (Força Aérea dos Estados Unidos) [7].

Uma investigação de juntas coladas que teve grande sucesso foi o programa *Primary Adhesively Bonded Structures Technology* (PABST) [1], [2], financiado pela USAF em finais dos anos 1970. Os resultados deste programa confirmaram e expandiram a lista de vantagens oferecidas por uma junta colada bem concebida comparativamente com ligações rebitadas. Nesta lista de pontos fortes inclui-se o peso reduzido, a resistência à fadiga aumentada, melhor capacidade de vedação, aerodinâmica mais eficiente e, na maior parte das vezes, custos reduzidos.

Tais vantagens estimularam também o uso das ligações coladas para compósitos de matriz polimérica em componentes de aeronaves. Por causa da natureza algo frágil dos compósitos, as ligações coladas são uma solução particularmente adequada para ligações compósito-compósito e compósito-metal [4].

A Figura 1.1 mostra os tipos fundamentais de juntas coladas. As mais utilizadas são as juntas de sobreposição. As juntas que têm melhor desempenho, mas custos de execução elevados, são as juntas em rampa (*scarf joints*). Estas têm aplicações muito específicas na aeronáutica para ligar peças de materiais compósitos de espessura relativamente elevada (acima de 5 mm). As juntas de reforço simples e de reforço duplo têm comportamento semelhante às juntas de sobreposição simples e dupla, respectivamente.

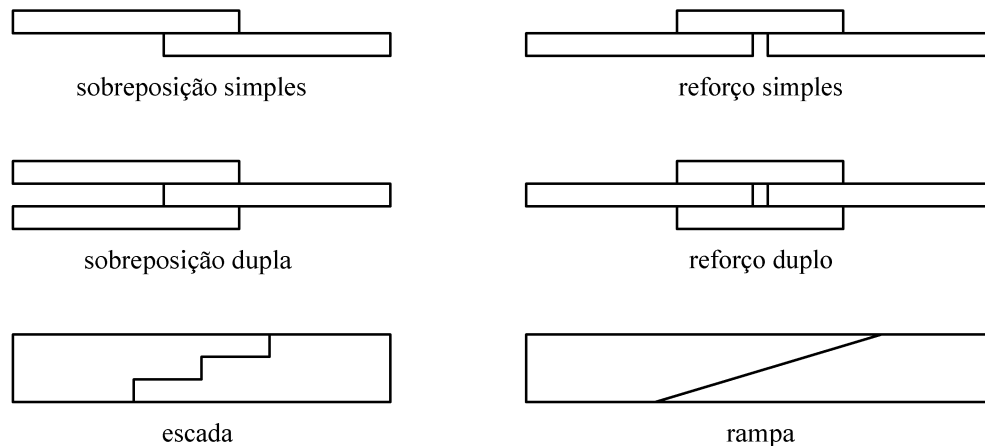


Figura 1.1. Tipos principais de juntas coladas [8].

Os principais modos de solicitação de uma ligação colada são tração (a), compressão (b), corte (c), clivagem (d), e arrancamento (e) (Figura 1.2). O adesivo deve ser apenas solicitado ao corte e à compressão pois todas as outras solicitações facilitam a rutura localizada.

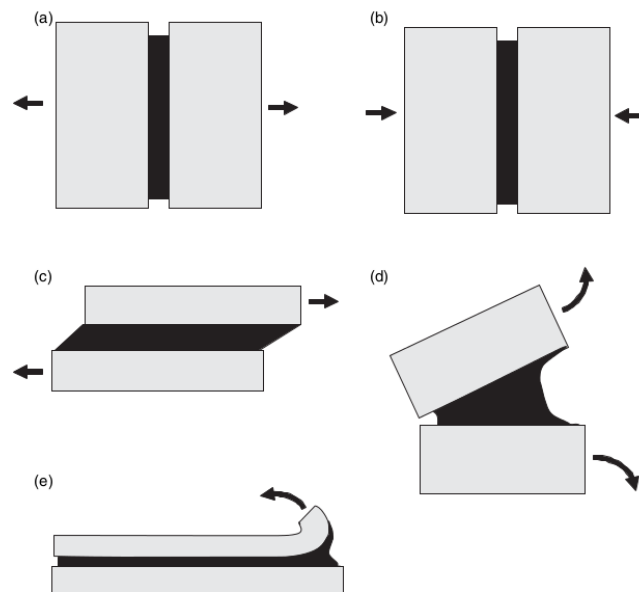


Figura 1.2. Principais modos de solicitação de juntas [77].

A ruína da junta pode dar-se de três formas [9] [10]:

- Rutura adesiva;

Ocorre na interface entre um dos aderentes e o adesivo, sendo também referida como falha interfacial. Após a rutura, verifica-se que a superfície de um dos aderentes não apresenta vestígios de adesivo e a superfície de rutura do outro aderente apresenta todo o adesivo.

- Ruína de um dos aderentes;

Quando a resistência do aderente é menor do que a resistência do adesivo ocorre uma rutura na região interna do aderente. Este modo de rutura é geralmente conhecido como rutura coesiva do aderente, ou do substrato.

- Rutura coesiva;

Ocorre na região interna do adesivo quando a resistência do adesivo é menor que a resistência entre adesivo e aderentes. Após a rutura verifica-se que as superfícies de ambos os aderentes estão cobertas de adesivo.

- Rutura mista;

Consiste numa combinação de rutura adesiva com rutura coesiva. Por vezes, este modo de rutura deve-se à limpeza previa de uma dada região das superfícies ligadas ter sido deficiente, ou a contaminação.

De facto, a boa preparação das superfícies dos aderentes é fundamental para garantir o bom desempenho da junta [11]–[14]. A preparação das superfícies tem por objetivos remover resíduos, aumentar a rugosidade para conseguir maior área efetiva de contacto adesivo/aderente e provocar alterações químicas favoráveis nas superfícies dos aderentes. A preparação pode envolver tratamentos de abrasão mecânica, limpeza, tratamentos químicos, etc.

A escolha adequada do adesivo é também essencial para o bom desempenho da junta. Os adesivos estruturais são normalmente polímeros termoendurecíveis, pois os termoplásticos são mais suscetíveis de fluência e de degradação por exposição ambiental. Devido aos elevados gradientes de tensões nas juntas de sobreposição, é de preferir as formulações dúcteis, que acabam por garantir maior resistência da junta. Os adesivos mais comuns para ligações com aderentes metálicos são os epóxidos e os acrílicos modificados. Os primeiros proporcionam geralmente ligações mais resistentes e duráveis. Por seu turno, os adesivos acrílicos (ditos modificados por serem derivados de formulações termoplásticas) são menos exigentes na preparação das superfícies e têm custos mais baixos.

O projeto de juntas coladas é ainda objeto de investigação [15]. A maior parte dos estudos tem-se centrado nas juntas de sobreposição com aderentes à tração (Figura 1.3), apresentando modelos de análise de tensões [2], [16], [17].

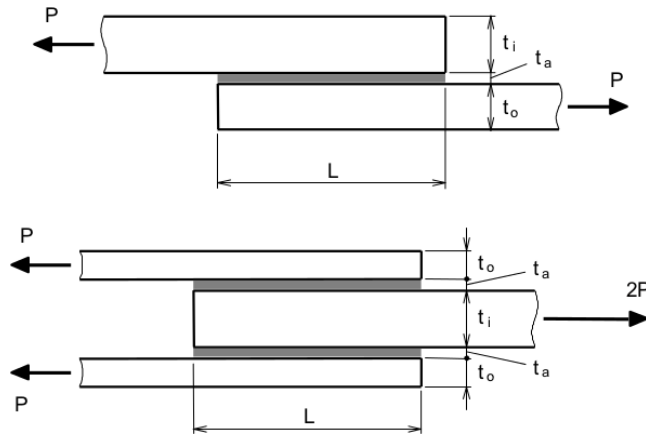


Figura 1.3. Juntas de sobreposição simples e dupla à tração [16].

As análises mostram a existência de tensões de clivagem junto aos bordos, assim como elevados gradientes de tensões de corte (Figura 1.4), aspetos que dificultam a previsão da rutura. Daqui decorre a importância da ductilidade do adesivo para poder reduzir os referidos gradientes por via de deformações plásticas.

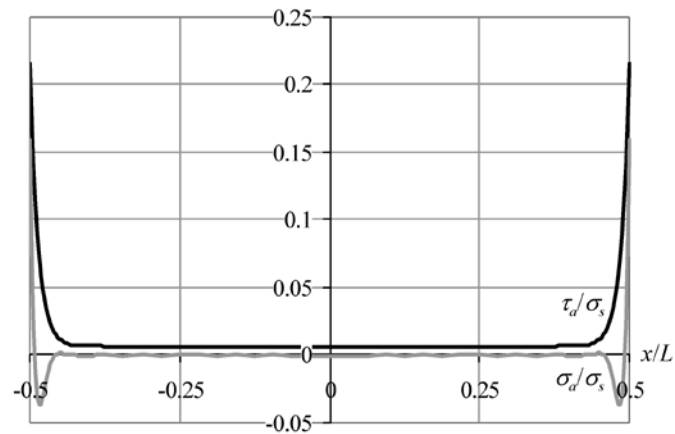


Figura 1.4. Distribuições de tensões de corte e normal no adesivo previstas pelo modelo de Goland-Reissner [5].

Por outro lado, os gradientes de tensões junto aos bordos podem conduzir ao aparecimento de fendas e favorecer a propagação destas perante cargas de fadiga. Logo, é também importante a tenacidade do adesivo [18].

1.2. *Fratura de juntas coladas*

A Mecânica da Fratura proporciona o enquadramento para avaliar o efeito da presença de fendas na resistência de estruturas [19]–[21]. A Mecânica da Fratura considera 3 modos de solicitação de fendas (Figura 1.5). O modo I é o mais estudado por ser considerado o mais gravoso.

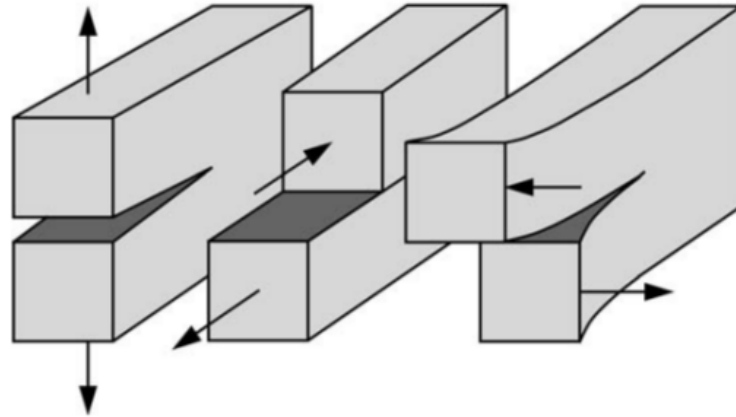


Figura 1.5. Modos de solicitação de fendas (Modo I, Modo II e Modo III respetivamente).

A aplicação da Mecânica da Fratura a ligações coladas foi proposta pela primeira vez por Ripling e outros [20]. Na altura das suas pesquisas, o fator intensidade de tensão (K) começou a ser aceite para descrever a fratura nos metais. Este fator define o nível de concentração de tensões em modo I

$$K_I = Y\sigma_R\sqrt{\pi a} \quad (1)$$

em que Y é um fator adimensional que depende da geometria e da distribuição de carga, σ_R é a tensão remota aplicada na direção perpendicular à direção da fenda e a o comprimento da fenda. A propagação da fenda ocorre quando K_I atinge o seu valor crítico, ou seja

$$K_I = K_{IC} \quad (2)$$

No entanto, o uso de K é complicado em estruturas heterogéneas. Ripling e outros [20] reconheceram que seria preferível usar a taxa de libertação de energia de deformação, G , em vez de K na descrição da fratura de juntas adesivas. Os seus trabalhos viriam a dar origem a uma norma ASTM em 1973 [22]. De facto, o uso de K também tinha por base o desenvolvimento sem restrições de uma zona plástica em redor da extremidade da fenda. Em juntas coladas, a zona plástica da camada adesiva é restringida pelos aderentes. Shaw [21] investigou este fenómeno e usou-o para reforçar a escolha de G em vez de K para descrever o comportamento à

fratura de ligações adesivas. Desde então, vários tipos de provetes foram utilizados para investigar o comportamento à fratura em modo I. O mais comum de todos é o *Double Cantilever Beam* (DCB) (Figura 1.6), atualmente normalizado pela ASTM D3433 e pela ISO 5528 [10].

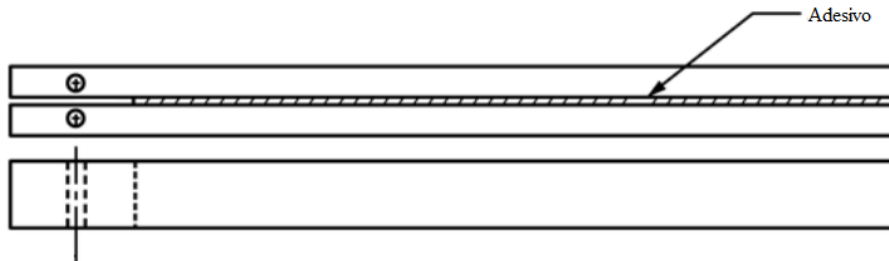


Figura 1.6. Provede DCB [23].

O provete DCB é constituído por aderentes metálicos ou compósitos colados por uma fina camada de adesivo. Durante o fabrico da junta é criada uma fenda inicial a partir de uma das suas extremidades através de uma película desmoldante fina. A transmissão da carga pode ser feita por furos nos aderentes (Figura 1.6) ou de blocos colados (Figura 1.7), solução habitual para provetes de aderentes compósitos de menor espessura.



Figura 1.7. Provede DCB com blocos colados.

Outro ensaio usado para caracterizar a fratura em modo I de ligações coladas é o *Tapered Double Cantilever Beam* (TDCB) (Figura 1.8). Tem a vantagem de não necessitar de monitorização do comprimento de fenda para o cálculo do G_{IC} . Esta dissertação não irá aprofundar este tipo de ensaio, mas sim o DCB.

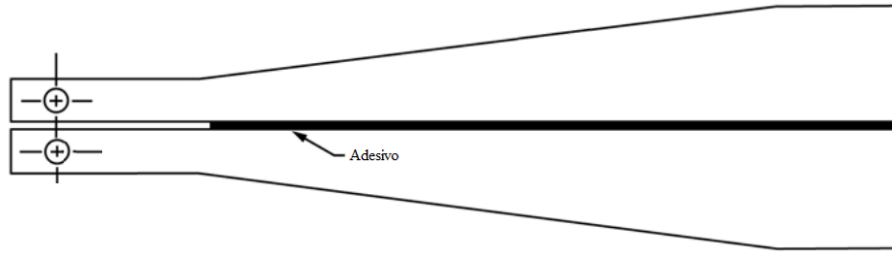


Figura 1.8. Provete TDCB.

1.3. Métodos para a determinação do G_{IC}

Ao longo dos últimos anos têm sido publicados diversos artigos acerca do cálculo da energia de fratura em modo I de juntas coladas (G_{IC}). São vários os métodos utilizados, entre os quais se destacam a *Calibração Experimental da Flexibilidade* (CEF) e a *Teoria das Vigas Corrigida* (TVC). Todavia, subsiste a dificuldade da monitorização do comprimento de fenda durante o ensaio, e a contabilização correta da energia dissipada na chamada Zona de Processo de Fratura (ZPF), conceito discutido adiante.

No provete DCB mede-se a carga P , o deslocamento δ e o comprimento de fenda a . A taxa crítica de libertação de energia de deformação G_{IC} foi inicialmente calculada através da versão simples da *Teoria das Vigas*, que considera cada aderente como viga encastrada com comprimento igual a a . Baseada em trabalhos de Mostovoy e outros [24] e implementada na norma ASTM [22], este método dita que a flexibilidade do provete $C = \delta/P$ pode ser obtida de

$$C = \frac{8(a^3 + h^2a)}{E_s B h^3} \quad (3)$$

sendo B a largura do provete, h a espessura do substrato e E_s o seu módulo de Young. A aplicação da relação de Irwin-Kies

$$G_I = \frac{P^2}{2B} \frac{dC}{da} \quad (4)$$

conduz a

$$G_{IC} = \frac{4P^2}{E_s B^2} \left(\frac{3a^2}{h^3} + \frac{1}{h} \right) \quad (5)$$

Outro esquema de tratamento de dados é a chamada **Teoria das Vigas Corrigida** (TVC), que pretende ter em conta a rotação e o deslocamento da secção dos substratos na extremidade da fenda através de um fator de correção Δ . Sem esta correção, a expressão para calcular a taxa de libertação de energia por este método seria a seguinte:

$$G_I = \frac{3P\delta}{2Ba} \quad (6)$$

Na prática esta expressão vai resultar em valores de G_I sobrestimados, pois os aderentes do provete não estão perfeitamente encastrados (isto é, vai haver rotação e deslocamento na secção da frente da fenda). Uma maneira de corrigir este problema é tratar o DCB como se tivesse uma fenda ligeiramente maior $a + \Delta$, onde Δ é determinado experimentalmente a partir do valor absoluto da intersecção negativa da reta de ajuste da raiz cúbica da flexibilidade, $C^{1/3}$, em função do comprimento de fenda (Figura 1.9). Os valores usados para este gráfico devem ser a carga e o deslocamento correspondentes com os comprimentos da fenda visualmente observados durante a propagação. Williams [25], demonstrou que

$$C = \frac{8(a + \Delta)^3}{E_s B h^3} \quad (7)$$

Eliminando E_s e usando (6), a taxa crítica de libertação de energia de deformação em Modo I seria:

$$G_{IC} = \frac{3P\delta}{2B(a + \Delta)} \quad (8)$$

Há ainda correções adicionais para o efeito dos blocos e para grandes deslocamentos [25]. Esta análise também permite um cálculo inverso para estimar o módulo de flexão do substrato

$$E_s = \frac{8(a + \Delta)^3}{CBh^3} \quad (9)$$

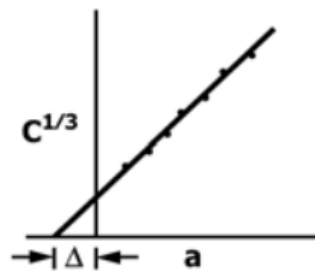


Figura 1.9. Determinação da correção do avanço da fenda

Segundo Blackman e outros [26], os valores de E_s não devem diferir mais de 10% do valor conhecido do módulo de Young do substrato para as medições poderem ser consideradas credíveis [26].

Finalmente, outro método de tratamento de dados é a **Calibração Experimental da Flexibilidade** (CEF). O método de Berry [27] toma por base a relação

$$C = ka^n \quad (10)$$

onde k e n são constantes determinadas experimentalmente.

Da aplicação da equação de Irwin-Kies (4) resulta

$$G_{IC} = \frac{nP\delta}{2Ba} \quad (11)$$

Com base na leitura visual da propagação da fenda e no registo continuo dos restantes valores, é feita uma regressão linear dos dados $\log(C)$ vs. $\log(a)$ (Figura 1.10), da qual resulta o parâmetro n , igual ao declive da reta de ajuste.

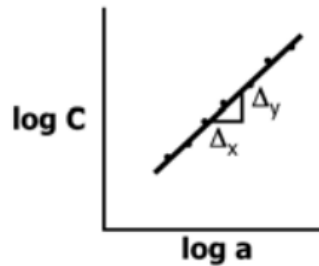


Figura 1.10. Calibração experimental da flexibilidade segundo o método de Berry.

Blackman e outros [26] realizaram em vários laboratórios ensaios DCB e TDCB de provetes com substratos de aço, alumínio e compósito de fibra de carbono. Demonstrou-se a importância de ter em conta a flexibilidade do sistema de carregamento e que a TVC é o método de tratamento de dados mais rigoroso [26]. Para efeitos de determinação de G_{IC} , Blackman e outros [26] concluíram que o critério de 5% de desvio ou carga máxima era o mais reprodutível [26].

Embora a utilização da mecânica da fratura na previsão da resistência de juntas adesivas tenha várias vantagens, a necessidade de definição prévia de uma pré-fenda, que por vezes é de difícil localização numa estrutura real, é uma desvantagem assinalável. Para ultrapassar as limitações inerentes aos critérios baseados na resistência de materiais [28]–[30] e na mecânica da fratura surgiram os modelos de zona coesiva (*cohesive zone models*) [31], [32].

1.4. Modelos de zona coesiva

Os modelos de zona coesiva (MZC) permitem prever o início da fenda a partir de critérios baseados nas tensões e, posteriormente, o crescimento da fenda usando critérios de mecânica da fratura [10].

Os fundamentos dos MZC foram desenvolvidos por Barenblatt (1962) e Dugdale (1960) [33]. Estes autores propuseram o conceito de zona de processo de fratura (ZPF - Figura 1.11) com o intuito de descrever o dano gradual junto à frente da fenda sob efeito de cargas quase-estáticas, dando assim início a métodos mais refinados [34]. A aplicação de MZC ao estudo da resistência de juntas adesivas tem sido frequente nos últimos anos. Isto deve-se em grande parte à sua recente incorporação em *software* de elementos finitos. Um MZC considera a deformação de uma camada de adesivo que, em situações 2D, pode estar sujeita a tensões normais e de corte (Figura 1.11).

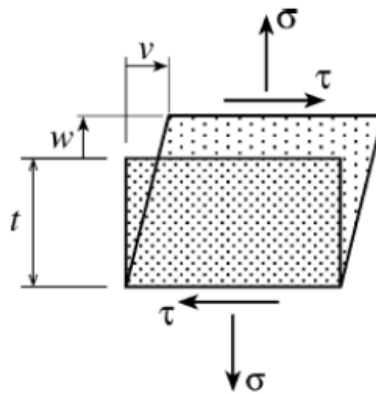


Figura 1.11. Modos de deformação de uma camada de adesivo de espessura t e respectivas tensões. σ representa a tensão de tração, w o deslocamento relativo na direção normal à camada de adesivo, τ a tensão de corte e v o deslocamento relativo de corte. [35]

Numa camada de adesivo que contenha uma fenda ou uma pré-fenda sujeita a solicitações de modo I, o deslocamento relativo δ_c das duas faces da fenda na extremidade é normalmente designado por *Crack Tip Opening Displacement* (CTOD) (Figura 1.12). Na ZPF que se segue à extremidade da fenda, há uma distribuição de tensões coesivas σ_c e de deslocamentos relativos δ_c (Figura 1.12).

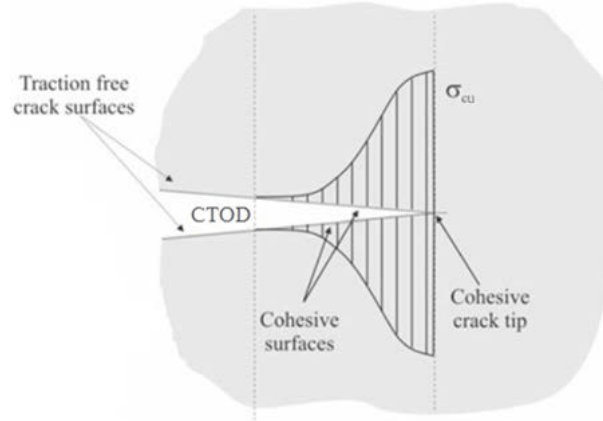


Figura 1.12. Representação do conceito de modelo de zona coesiva [36].

O processo de iniciação e propagação da fenda obedece a uma lei coesiva, ou lei tração-separação. A Figura 1.13 representa algumas das leis coesivas mais usadas em MZC: a lei elástico-perfeitamente plástica, a lei bilinear e a lei trapezoidal [36]–[50]. Em primeiro lugar há uma resposta linear elástica pelo material até que é atingida uma resistência coesiva σ_{cu} . Segue-se eventualmente uma fase de deformação plástica, após a qual se dá o amaciamento gradual até à libertação total de tração. A regra principal da lei coesiva em modo I é que a área compreendida entre a curva tração-separação e o eixo de separação tem de ser igual a G_{IC} , ou seja,

$$G_{IC} = \int_0^{\delta_{cu}} \sigma_c d\delta_c \quad (12)$$

Logo, G_{IC} pode ser considerada a energia de fratura.

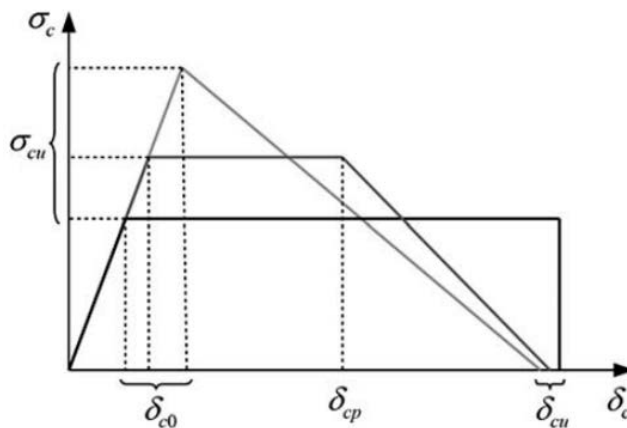


Figura 1.13. Representação das leis bilinear, trapezoidal e da elástico-perfeitamente plástica [50].

A lei tração-separação pode ser obtida experimentalmente e através de métodos ditos direto e inverso [51], [52], [53], tendo para tal sido apresentados vários métodos abaixo descritos.

1.5. Estudos recentes

Carlberger e outros em 2010 [41] estudaram a influência da espessura da junta de um adesivo epóxico nas suas propriedades coesivas. A energia de fratura foi calculada através de um método baseado no *integral – J*. As leis coesivas foram obtidas com base no chamado método direto, em que é medida a separação na extremidade da fenda inicial e a tração é determinada de

$$\sigma_c = \frac{\partial J}{\partial \delta_c} \quad (13)$$

Os referidos autores verificaram que a energia de fratura era o parâmetro mais sensível a variações de espessura: para espessuras entre 0.1 e 1.0 mm, a energia de fratura aumentava consistentemente. Já com espessura de 1.6 mm mediu-se uma energia de fratura ligeiramente menor que com 1.0 mm.

Outro método de tratamento de dados que é cada vez mais usado é o chamado **Método da Fenda Efetiva** (MFE) [54]. Este método recorre à TVC e aos valores experimentais de flexibilidade C para calcular o comprimento de fenda efetivo

$$a_e = \frac{h}{2} \sqrt[3]{E_s B C} \quad (14)$$

que é depois usado para obter

$$G_I = \frac{3P\delta}{2Ba_e} \quad (15)$$

As grandes vantagens do MFE são:

- evita a necessidade de monitorizar a propagação da fenda;
- considera o efeito da ZPF nas medições.

A temperatura tem uma forte influência nas leis coesivas. Walander e outros [49] realizaram uma série de ensaios em Modo I e II com provetes fabricados com substratos de aço SP498 e cola epóxida com espessura de 0.3 mm para avaliar a influência da temperatura. Estes ensaios foram realizados num intervalo de temperaturas abaixo da transição vítrea do adesivo epóxico. Walander e outros [49] concluíram que, em modo I, a rigidez elástica e a tensão máxima decrescem com um aumento de temperatura. Já a energia de fratura G_{IC} manteve-se independente da variação de temperaturas avaliada.

Uns anos depois, com a entrada dos adesivos de poliuretano (adesivo dúctil) no mercado, Campilho e outros [40] foram pioneiros no estudo da influência da espessura deste adesivo na energia de fratura. Para tal utilizaram provetes DCB de alumínio AA6082 T651 colados com Sikaforce®. Campilho e outros [40] desenvolveram um método ótico para medir os parâmetros necessários à aplicação dos métodos MVBF e do *integral – J*. Os referidos autores encontraram uma tendência linear crescente entre G_{IC} e a espessura do adesivo até 2.0 mm.

Com o objetivo de determinar a lei coesiva para o adesivo estrutural Hysol EA-9394, Han e Siegmund [44] verificaram que a redução da espessura de adesivo resultava em roturas na interface substrato/adesivo. Reportaram também o facto de a espessura ideal depender dos substratos e do tratamento da superfície.

Alfano e outros [36] utilizaram a simulação numérica para determinar os parâmetros da lei coesiva através do método inverso, ou seja, por ajuste dos parâmetros da lei até atingir boa concordância com os resultados experimentais. Alfano e outros [36] aplicaram os três modelos de leis coesivas mais usados (bilinear, triangular e trapezoidal), e estudaram a extensão da zona de processo de fratura.

De Moura e outros [48] propuseram um procedimento simples para determinar leis coesivas de juntas coladas em modo I, utilizando provetes DCB de aço DIN Ck45 e cola Araldite® 2015. Neste método apenas seriam necessários os dados da curva carga-deslocamento e o CTOD medido no decorrer do ensaio. Esta simplificação foi alcançada através de uma abordagem analítica envolvendo a flexibilidade do provete, a teoria das vigas de Timoshenko [55] e o conceito de fenda equivalente. O método foi validado numericamente através de uma análise de elementos finitos realizada no programa Abaqus®.

Constante e outros [42] realizaram ensaios DCB com o objetivo de medir o G_{IC} e obter um modelo de zona coesiva, tendo aplicado o mesmo método ótico de Campilho e outros [40]. Para um adesivo mais frágil (Araldite® AV138) a lei coesiva triangular revelou-se adequada, enquanto que nos adesivos dúcteis, a lei trapezoidal era mais apropriada.

Recentemente, Moraes [38] estudou os efeitos tridimensionais nos ensaios DCB, que fazem com que a fenda não se propague uniformemente da direção da largura. Esses efeitos devem-se sobretudo às deformações anticlásticas resultantes dos efeitos de Poisson associados à curvatura longitudinal dos aderentes. Isto causa distribuições não uniformes de G_I ao longo da largura que promovem a iniciação prematura da fenda no centro do provete e, posteriormente,

uma frente de fenda curva. Assim, a habitual medição de comprimentos de fenda e de deslocamentos nos bordos comporta necessariamente alguns erros.

Surgiu deste estudo a ideia de monitorizar a propagação de fenda através de uma técnica ótica recente, ideia que foi avaliada nesta dissertação.

1.6. Correlação Digital de Imagem

Desde a invenção da fotografia, o homem tem usado imagens para capturar, armazenar e analisar coisas em que estava interessado. Com os desenvolvimentos na área da fotografia digital, iniciados em 1957, e a evolução na capacidade dos computadores, é hoje em dia possível usar a tecnologia de processamento de imagem como método de análise e medição bastante preciso. As principais vantagens do processamento de imagem são a flexibilidade, adaptabilidade e a capacidade de lidar com uma elevada quantidade de informação fácil e rapidamente.

Vários exemplos de sucesso destas aplicações podem ser vistos em áreas como a biomedicina, indústria, vigilância, mapeamento e, de interesse para este trabalho, na análise de deformações mecânicas. De facto, o processamento digital de imagem é cada vez mais utilizado em ensaios de caracterização de materiais, com nítidas vantagens sobre a extensometria clássica e vídeo-extensómetros, desde logo porque permite medições ao longo de uma área e não apenas entre alguns pontos, como acontece nas metodologias tradicionais.

A Correlação Digital de Imagem (CDI) começou a ser desenvolvida por Sutton e outros [56]–[58] e Bruck e outros [59]. Esta técnica consiste em fotografar imagens consecutivas através de uma/duas (2D/3D) câmaras digitais durante a deformação do material e, através de um algoritmo de correlação matemática, calcular os deslocamentos das superfícies exteriores do objeto sujeito às cargas mecânicas. A zona que vai ser lida por este sistema terá de ser preparada mediante a criação de um padrão de textura aleatória (padrão *speckle*), que se baseia num conjunto de pontos pretos e brancos (Figura 1.14). O padrão inicial será então comparado com o padrão “deformado” das outras fotografias, e através dos deslocamentos dos seus pontos o *software* calcula as deformações.

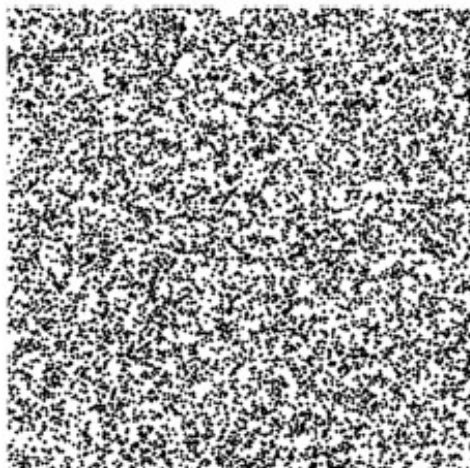


Figura 1.14. Padrão *speckle*.

Na aplicação da CDI devem ser utilizadas fontes de iluminação de cor branca, estáveis e controláveis, direcionadas para o objeto em estudo, de modo a garantir um bom contraste nas imagens e precisão na correspondência do padrão. Isto leva a que a maioria das aplicações desta técnica sejam efetuadas em laboratório, permitindo controlar mais facilmente o ambiente. Em meio exterior, em que ocorrem variações nas fontes de iluminação, a similaridade entre imagens tende a diminuir.

A CDI tem sido utilizada frequentemente em diversos ensaios de caracterização de materiais [60], [61]. Em particular têm sido desenvolvidas diversas metodologias com base na CDI para estudar o comportamento à fratura de diversos materiais [62], [63]. Xavier e outros [64] utilizaram esta técnica para medir o CTOD em modo I.

Makeev e outros [65] foram financiados em 2014 pelo VLRCOE (*U.S. Army and Navy Vertical Lift Research Center of Excellence*) para encontrarem métodos que medissem as propriedades mecânicas tridimensionais de compósitos. Estes autores recorreram à CDI para, através de um único ensaio, obterem o máximo de propriedades possíveis. Eles conseguiram, pela primeira vez, caracterizar diversas propriedades interlaminares do material. Makeev e outros [65] afirmaram que métodos baseados na CDI podem ser extremamente úteis para um entendimento dos mecanismos de rutura complexos dos compósitos, conseguindo melhorar a eficiência na caracterização do comportamento dos materiais.

Ribeiro e outros [66] fizeram um estudo com três métodos óticos diferentes: interferometria eletrónica de padrões *speckle* [67], interferometria de Moiré [68], [69] e a CDI. O seu objetivo era acompanhar o campo dos deslocamentos de uma fenda numa placa plana. Conseguiram determinar o fator de intensidade de tensão com os três métodos diferentes, concluindo que a CDI era a técnica menos dispendiosa e mais versátil, apesar de exigir enorme poder computacional.

Nesta dissertação a CDI será utilizada de uma forma original no intuito de acompanhar a propagação da fenda. O sistema utilizado será o ARAMIS (Figura 1.15) [70], [71].



Figura 1.15. Sistema de correlação digital de imagem ARAMIS.

1.7. *Ideia base a desenvolver*

Neste trabalho procurou-se aplicar uma nova técnica de monitorização da propagação da fenda usando a CDI. Como se viu anteriormente, visualizar a fenda num dos bordos comporta sempre alguns erros. O objetivo principal da nova técnica é ter uma perspectiva mais completa e rigorosa da frente da fenda dispondo de medições a toda a largura do provete com a CDI.

Os fundamentos da técnica são fáceis de apreender. Numa secção a uma distância $x < a$ do ponto de carregamento (Figura 1.16), ou seja, na qual a fenda já passou, o momento fletor é $M = Px$.

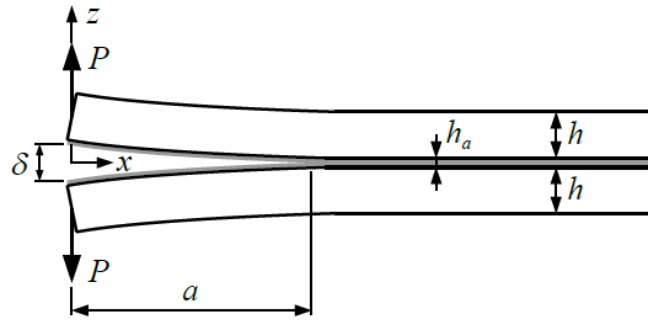


Figura 1.16. Representação do provete DCB.

Da Mecânica dos Sólidos sabemos que as tensões de flexão à superfície são dadas por

$$\sigma_x = \frac{Mh/2}{I} \quad (16)$$

em que $I = bh^3/12$ é o segundo momento de área do aderente. Logo, as extensões correspondentes podem obter-se de

$$\varepsilon_x = \frac{Pxh}{2EI} \quad (17)$$

Isto mostra que, para cada secção x após a fenda, deve haver uma relação linear $\varepsilon_x - P$. Visto de outra forma, o fator P/ε_x numa secção x deve estabilizar em

$$\frac{P}{\varepsilon_x} = \frac{2EI}{xh} \quad (18)$$

fator este tomado em valor absoluto, pois, na verdade, as extensões nas superfícies dos aderentes são de compressão.

Daqui resulta a ideia base desenvolvida neste trabalho, que consistiu em determinar o instante em que a fenda atravessa um determinado ponto do provete através das extensões ε_x medidas pelo ARAMIS e pelas correspondentes cargas P .

2. Procedimentos experimentais

2.1. *Preparação dos provetes DCB*

O fabrico de provetes DCB consistiu em unir dois substratos (aderentes) com a cola (adesivo) que se pretenda caracterizar.

Foi escolhido como material dos aderentes a liga de alumínio AW7075-T651, cujas propriedades mecânicas principais são dadas na Tabela 1.

Tabela 1. Propriedades da liga AW7075-T651 [72]

Densidade	2.81 g/cm ³
Tensão de rotura	572 MPa
Tensão de cedência	503 MPa
Alongamento	11 %
Dureza de Brinell	150
Modulo de elasticidade	71.7 GPa
Coefficiente de Poisson	0.33

De modo a confirmar as propriedades do material foi feito um ensaio de tração num provete de dimensões 8,26x12,6x600 mm. A Figura 2.1 mostra a curva tensão-deslocamento, que confirmou em termos aproximados o valor da tensão de cedência dado na Tabela 1.

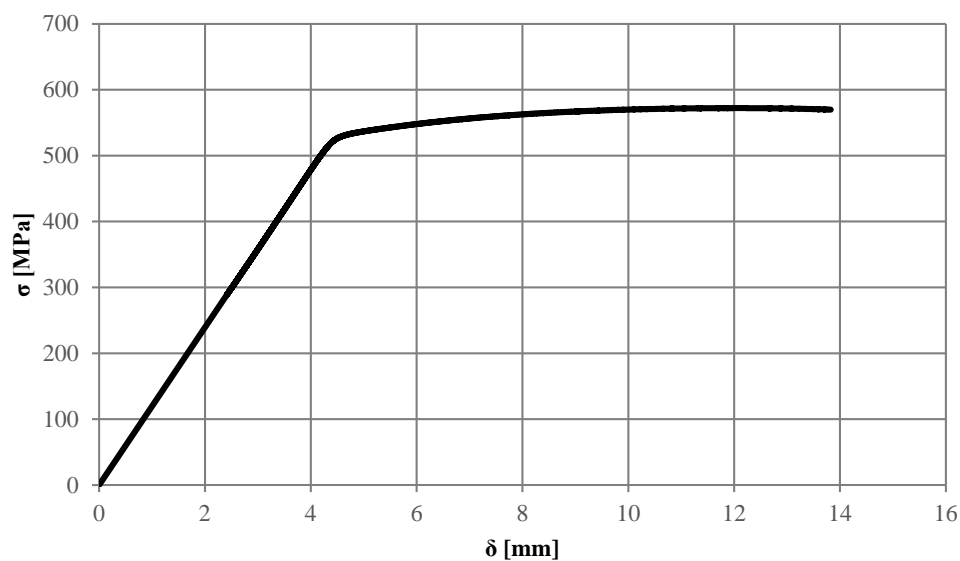


Figura 2.1. Curva tensão-deslocamento medida no ensaio de tração para a liga de Al.

Escolheu-se para este trabalho o adesivo epóxico 3M™ Scotch-Weld™ 2216 B/A Gray. Este adesivo de duas partes pode ser curado à temperatura ambiente ou a temperaturas mais elevadas. Tem aplicações aeroespaciais e na aviação devido à sua elevada resistência de arrancamento e de corte. A Tabela 2 apresenta as propriedades disponíveis.

Tabela 2. Propriedades do adesivo fornecidas pelo fabricante @24°C [73].

Tensão de rotura ao corte	22 MPa
Módulo de Young ao corte	342 MPa

Foram maquinados de uma placa 40 substratos com dimensões nominais 8.3x20x250 mm com o objetivo de fabricar 20 provetes DCB. As medidas rigorosas de largura e espessura foram feitas com um paquímetro.

Após a maquinagem todos os substratos foram submetidos a uma operação de limpeza e desengorduramento com acetona, de modo a eliminar qualquer resíduo de óleo da superfície. De forma a obter melhor adesão do adesivo, cada superfície de substrato que iria levar cola foi granalhada (Figura 2.2). Para tal foi projetado à pistola coríndon branco de grão 60 (0.212 - 0.300 mm).



Figura 2.2. Projeção de granalha.

Após a granalhagem (Figura 2.3), foi medida a rugosidade de todos os substratos com um rugosímetro Hommel Tester T1000 e obtiveram-se valores muito semelhantes em todos eles (Tabela 3.).



Figura 2.3. Substratos após processo de granalhagem.

Tabela 3. Perfil de rugosidades das superfícies dos substratos decapados [74].

R_z	R_a	R_k	R_{ms}	R_{tz}	R_p	R_q
25.92	4.02	10.97	80	18.02	18.34	5.18

Seguidamente, cada substrato foi novamente limpo com acetona de forma a eliminar todos os resíduos que subsistiam. Procurou-se efetuar a colagem logo após esta segunda limpeza das superfícies, de modo a evitar contaminação e oxidação dos substratos. No entanto, como todos os substratos não iriam ser colados ao mesmo tempo, revestiram-se em unidades separadas com várias camadas de papel e armazenaram-se dentro de um armário sem humidade.

Para efetuar as colagens procedeu-se inicialmente à mistura das duas partes do adesivo. Para tal usou-se como superfície de mistura uma placa de acrílico anteriormente limpa com acetona. As medidas de volume indicadas pelo fabricante são de duas partes brancas e três partes cinzentas. Com uma espátula de madeira as duas partes foram bem misturadas até se obter um padrão homogêneo de cor cinza (Figura 2.4).



Figura 2.4. Mistura homogênea da cola.

De seguida foi aplicada uma camada fina uniforme de cola pela superfície do substrato com a espátula de madeira. Antes da montagem dos provetes foi aplicada uma película de PTFE de espessura $75\ \mu\text{m}$ para gerar a fenda inicial (Figura 2.5). A espessura da película foi confirmada através de um micrómetro. A película de PTFE também foi usada para garantir a espessura de cola pretendida, sendo aplicadas três camadas de forma a obter uma espessura de cola de $225\ \mu\text{m}$. Foram então montados os provetes um a um, com o auxílio de um dispositivo tipo esquadro para garantia de alinhamento (Figura 2.6). Colocou-se ainda papel entre o provete e o dispositivo para facilitar a remoção do provete após a cura.

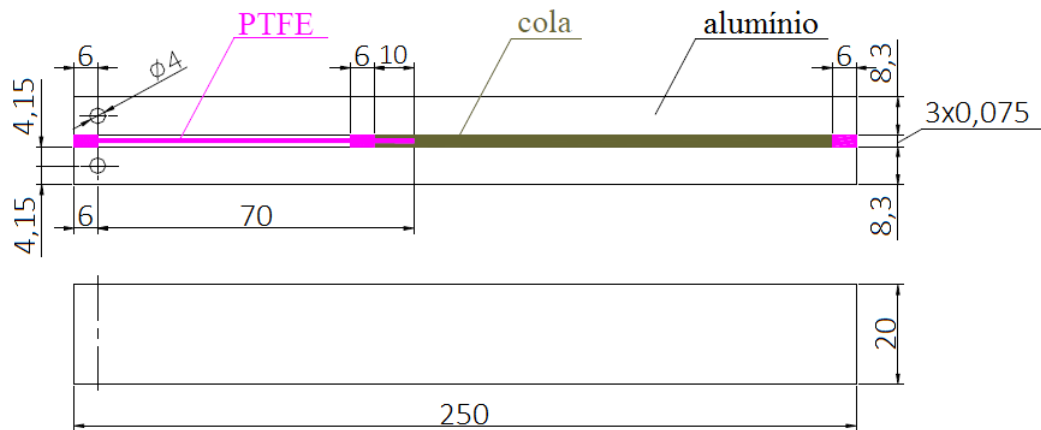


Figura 2.5. Provete DCB.

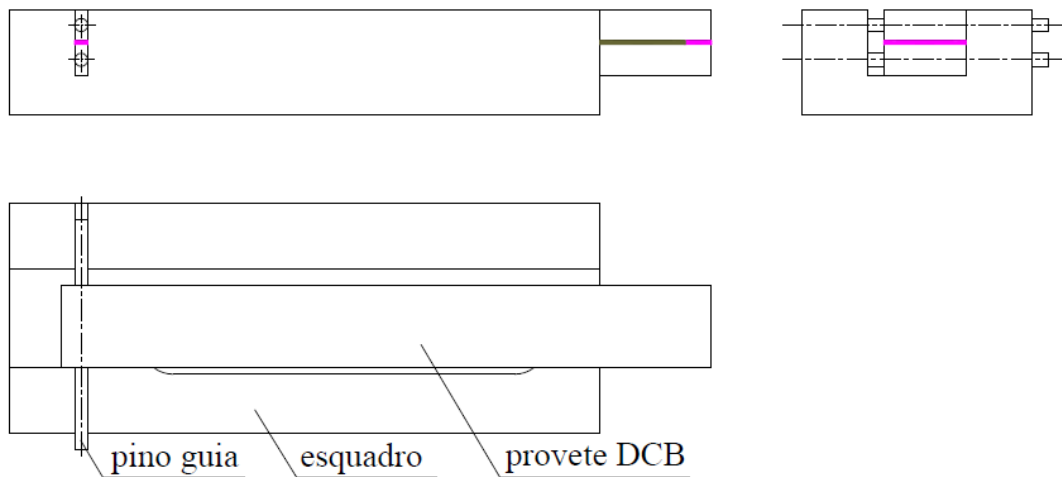


Figura 2.6. Montagem do provete com auxílio do dispositivo tipo esquadro.

Como o processo de cura à temperatura ambiente seria demorado (Tabela 4), optou-se por fazer a cura a 84°C recorrendo ao forno disponível no laboratório do departamento de Engenharia Mecânica.

Tabela 4. Temperaturas de cura fornecidas pelo fabricante da cola.

Temperatura de cura	Tempo
24°C	7 dias
66°C	120 min.
84°C	60 min.
93°C	30 min.

Para melhor controlo da temperatura, usou-se um Termopar (Figura 2.7) que se verificou previamente estar a funcionar corretamente através da temperatura mostrada para água a ferver (aproximadamente $100^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$). Inseriu-se então o fio do termopar dentro do forno e confirmou-se que era atingida a temperatura pretendida. Na realidade, prolongou-se o tempo de estágio no forno por mais 20 minutos para ter em conta o tempo de aquecimento dos conjuntos provete/dispositivo. Foi ainda colocado um peso sobre cada provete para garantir a pressão necessária à colagem.



Figura 2.7. Visor do termopar a mostrar a temperatura pretendida

Após cura, o provete apresentava excessos de cola nos bordos (Figura 2.8) que foram removidos com auxílio de um x-ato. Foi depois avaliada a espessura da cola através de um microscópio disponível no laboratório do DEM. Verificou-se uma variação máxima de 0.015 mm em torno do valor esperado.



Figura 2.8. Provete após processo de cura no forno.

Fabricado o provete DCB, procedeu-se à aplicação do padrão *speckle* essencial para a CDI. Este processo foi algo delicado, pois o padrão teria de apresentar uma concentração de pontos negros adequada ao tamanho da área em que se pretendia fazer medições. Primeiro aplicou-se tinta branca e depois, com cuidado, uns chapiscos de tinta preta, de modo a criar o padrão (Figura 2.9).



Figura 2.9. Provetes DCB com padrão Speckle.

2.2. *Preparação dos ensaios*

A máquina de ensaios usada para este estudo foi a Shimadzu AG – 50kNG (Figura 2.10) presente no laboratório do departamento de Engenharia Mecânica. Face às cargas máximas previstas, montou-se uma célula de 5 kN (Figura 2.11).



Figura 2.10. Shimadzu AG – 50kNG.



Figura 2.11. Montagem da célula de carga de 5 kN na máquina Shimadzu.

Foi necessário medir a flexibilidade de todo o sistema de carregamento, com a nova célula de carga e suportes utilizados nos ensaios devidamente montados. Para tal foi utilizada uma peça rígida já maquinada para esse propósito (Figura 2.12). Montou-se então a peça no lugar do provete e procedeu-se a um ensaio para obter a referida flexibilidade (Figura 2.13).



Figura 2.12. Peça usada na medição da flexibilidade do sistema de carregamento.



Figura 2.13. Montagem para medição da flexibilidade do sistema de carregamento.

A flexibilidade do sistema de carregamento foi definida pelo declive da reta de aproximação do gráfico de força/deslocamento medido neste ensaio (Figura 2.13). A flexibilidade resultante foi de 0.0003706 N/mm .

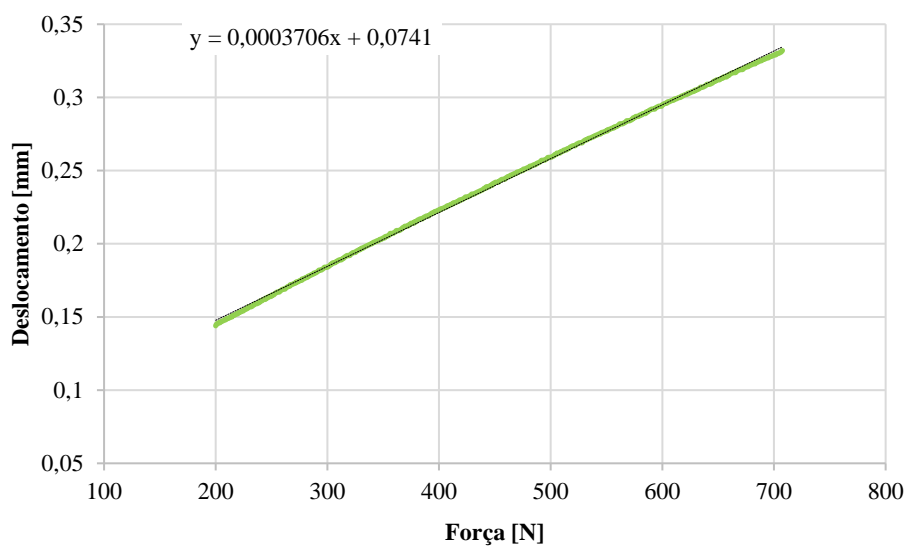


Figura 2.14. Valores de força e deslocamento medidos e reta de ajuste do ensaio de medição da flexibilidade do sistema de carregamento.

2.3. *Preparação do sistema ARAMIS*

Antes de mais, é de relembrar que se pretendia medir as deformações na superfície superior do provete DCB, numa zona imediatamente a seguir à frente da fenda (Figura 2.15).



Figura 2.15. Zona de medições do provete DCB.

O primeiro passo foi escolher a posição das câmaras do sistema ARAMIS que fosse adequada às medições. De facto, as câmaras têm de ser posicionadas tendo em atenção especial o ângulo entre elas, o afastamento e a distância ao objeto a medir. O **Anexo A** dá mais detalhes a este respeito. É ainda necessário ter em conta que este sistema precisa de ser calibrado na posição em que vai ser utilizado. A posição escolhida para as medições requeria um suporte próprio que assegurasse a correta posição do calibrador. Face aos elevados montantes dos orçamentos da GOM® para o suporte, optou-se pelo projeto e fabrico de um suporte simples que atendesse principalmente às necessidades deste trabalho, mas que também que pudesse ser utilizado em futuros projetos.

No início da calibração é necessário que o calibrador escolhido (Figura 2.16) esteja paralelo às câmaras e à mesma distancia do objeto/superfície a ler.

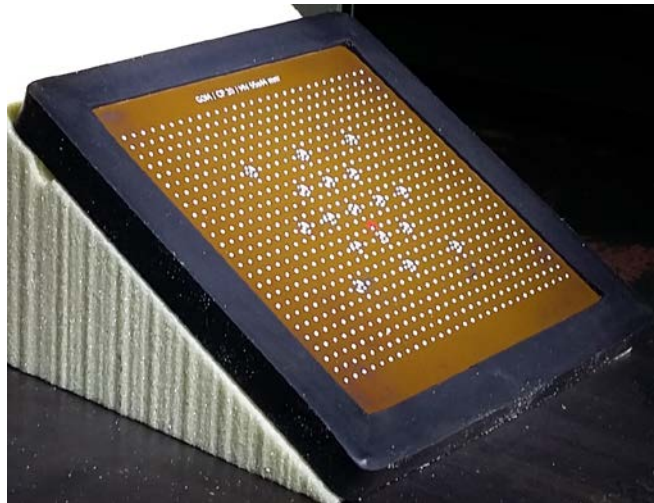


Figura 2.16. Calibrador *CQ/CP20 55X44*

Outros requisitos impostos pelo processo de calibração [70] eram a capacidade de:

- gerar movimentos de inclinação de 45° para trás;
- rotação do calibrador para a direção paralela às câmaras;
- aproximação e afastamento do calibrador.

Daqui resultou o suporte mostrado nas Figuras 2.17 e 2.18, que providencia:

- a) Encosto ligeiramente menor do que o calibrador e furo roscado na face inferior;
- b) Chapa possibilitadora de deslizamento e rotação do encosto nas direções necessárias e com quatro furos para ser posterior ligação;
- c) Fixador com quatro furos roscados para aparafusar a chapa e ligar a montagem à amarra da Shimadzu.

O **Anexo B** apresenta desenhos de definição do suporte

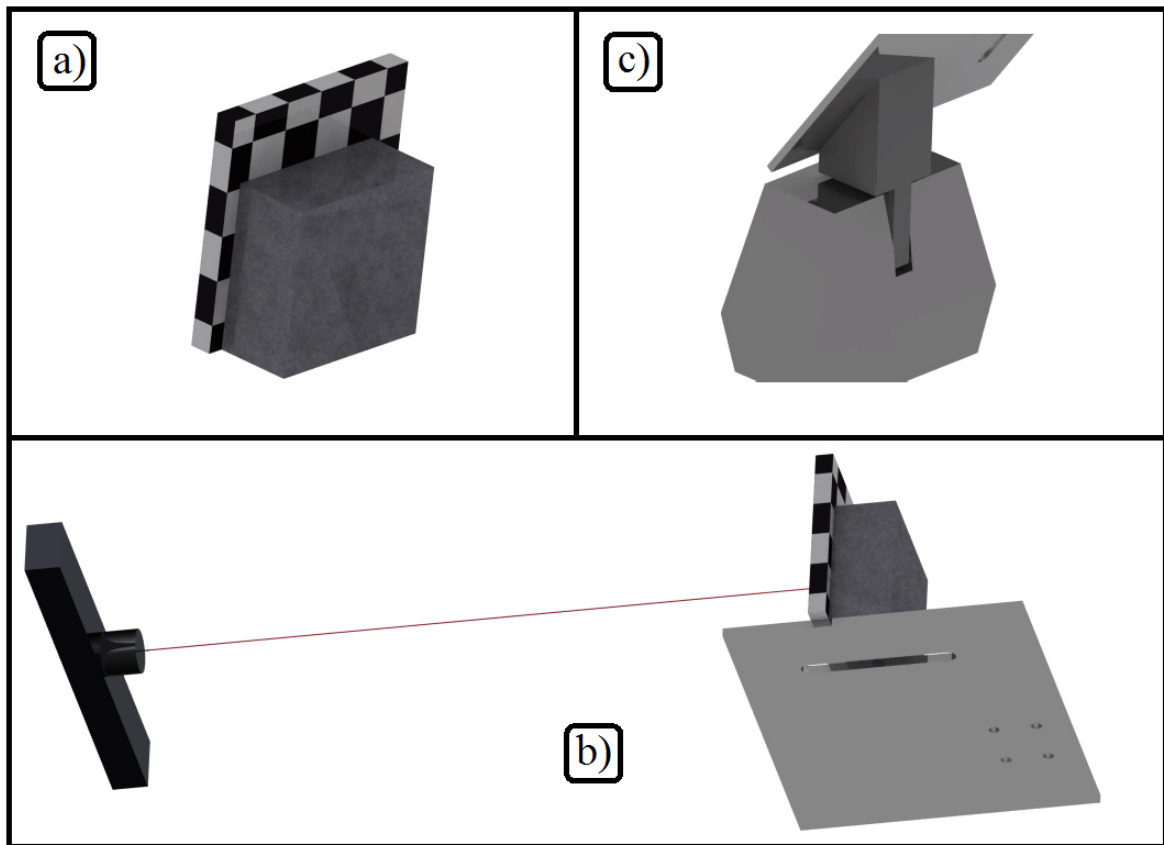


Figura 2.17. Representação do suporte angular fabricado.



Figura 2.18. Suporte de posicionamento angular na posição normal às câmaras.

Após o fabrico do suporte, este foi instalado na amarra (Figura 2.19), garantindo-se a mesma inclinação das câmaras (53°) através de um medidor de inclinação digital, assim como a distância adequada (393 mm) medida com fita métrica.



Figura 2.19. Início da calibração

Finalmente, a instalação do sistema foi feita de acordo com o manual [70], [71], processo também já documentado na dissertação de Domingues [75].

2.4. *Ensaaios DCB*

O dispositivo de ensaio DCB consistiu em duas barras presas nas amarras de cunha da máquina Shimadzu. As barras tinham extremidades em forqueta (Figura 2.20) com furos para alojar as cavilhas de diâmetro 3.75 mm que transmitiam carga ao provete. A chapa colada na barra inferior tinha por fim fazer uma correção de movimentos indesejados do provete no software ARAMIS. Todavia, não se conseguiu aplicar esta correção devido à resolução desejada para leitura de extensões no ARAMIS não permitir área de leitura suficiente.



Figura 2.20. Provete DCB montado no dispositivo de ensaio.

No sistema ARAMIS definiu-se cuidadosamente a área pretendida para as medições (Figura 2.21). A linha negra da esquerda corresponde a uma distância de 5 mm antes da fenda inicial, sendo de extrema importância marcar esta fronteira da zona de leitura.

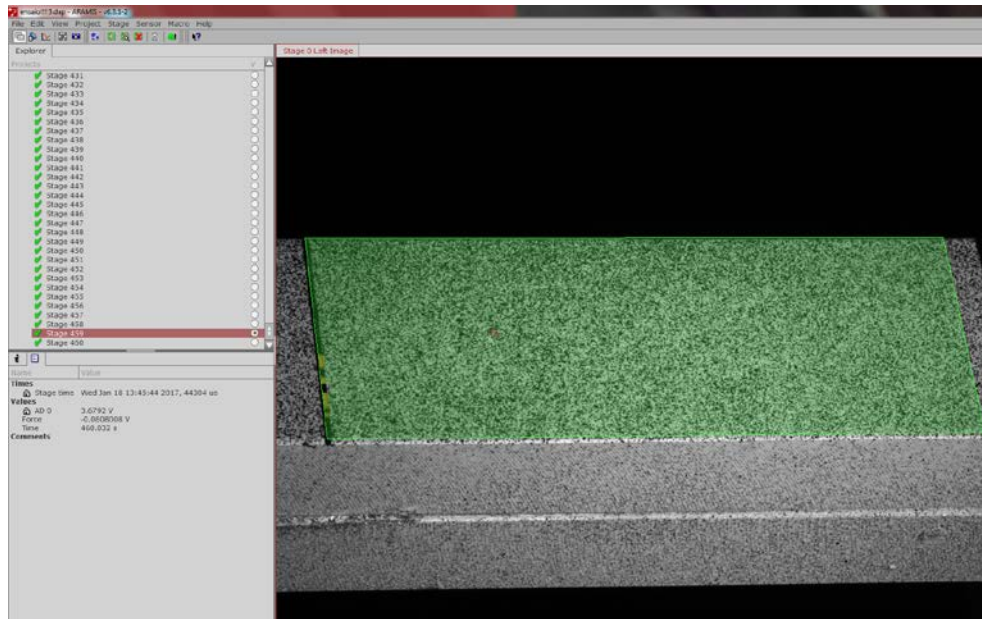


Figura 2.21. Zona selecionada para leitura no software ARAMIS.

Após esta seleção e iniciado o ensaio, o software registra dados em estágios (*stages*) de 1 segundo. Neste processo, as fotografias das duas câmaras (Figura 2.22) são combinadas entre si, criando uma projeção 3D de cada ponto. O programa calcula todas as extensões (Figura 2.23) através da comparação dos deslocamentos dos pontos do padrão.

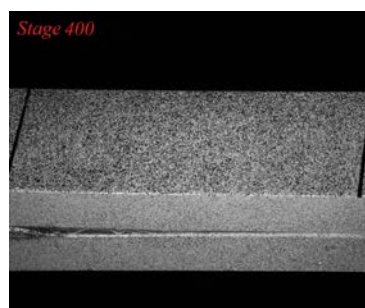
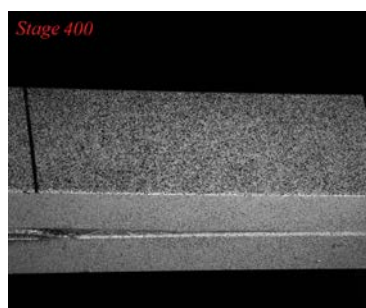
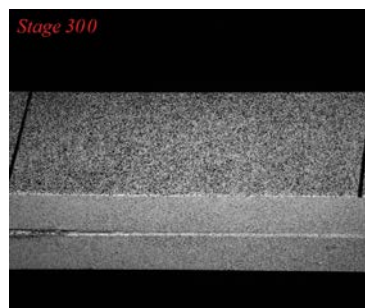
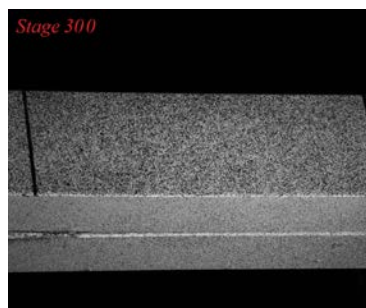
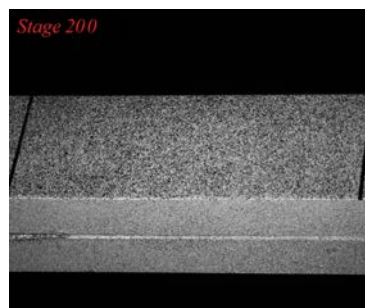
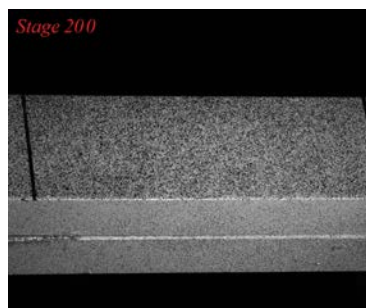
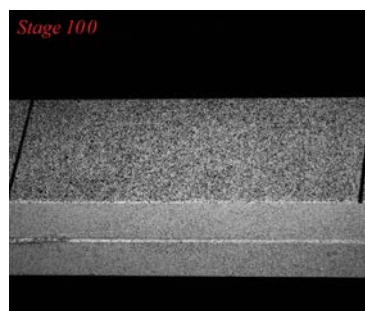
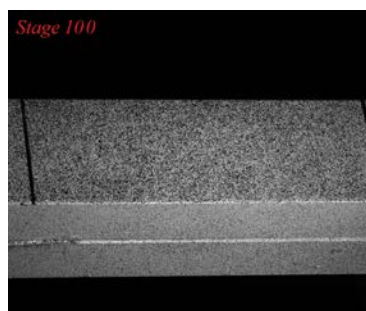
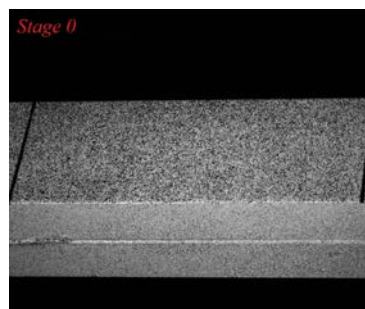
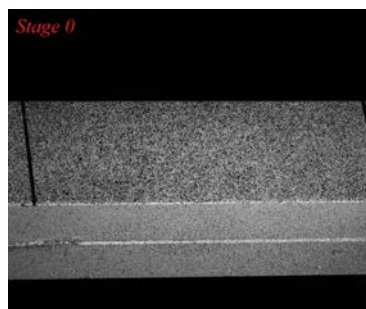


Figura 2.22. Exemplos de fotografias das câmaras do ARAMIS.

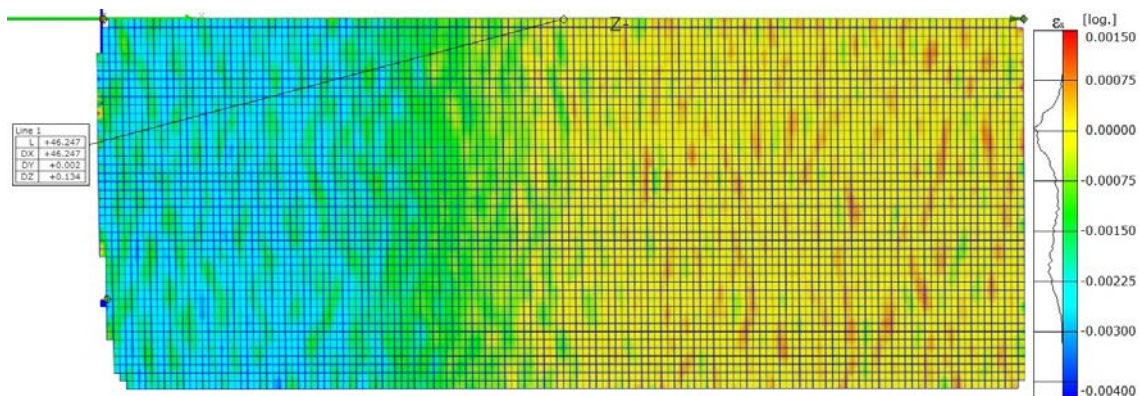


Figura 2.23. Extensões longitudinais ε_x calculadas pelo ARAMIS.

Como se viu no capítulo 1.7, pretendia-se medir as deformações longitudinais ε_x . Sabendo que a fenda não se ia propagar uniformemente através da largura, foram definidas secções equidistantes (Figura 2.24) para posterior tratamento de dados. Todavia, o *software* tem uma forma peculiar de indicar a posição dos pontos no ficheiro de resultados. Em vez de, como seria esperado, indicar as coordenadas dos pontos de acordo com o sistema de eixos definido, o *software* dá a distância em relação ao primeiro ponto dessa secção. Para obter as coordenadas de interesse, calculou-se a distância do primeiro ponto de cada secção até ao eixo transversal y , que corresponde à linha negra acima referida (Figura 2.25).

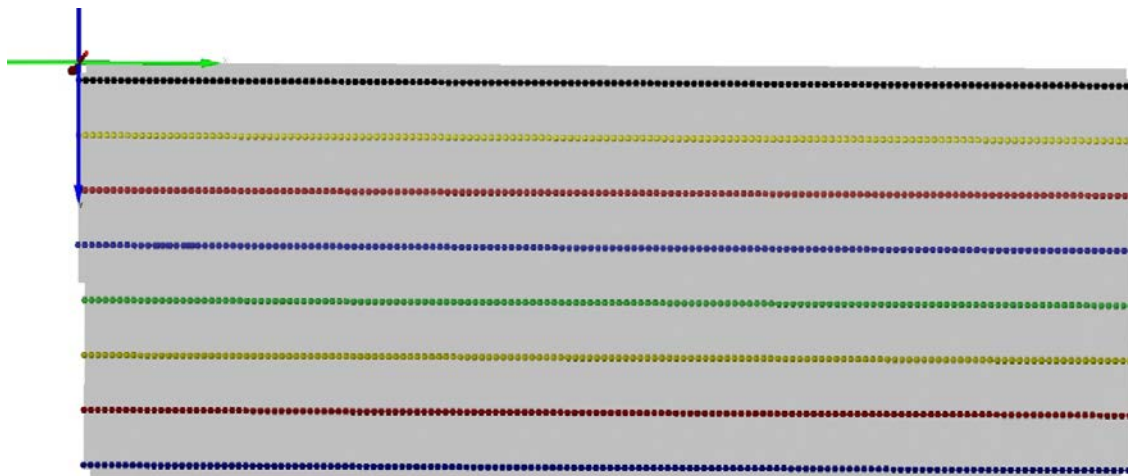


Figura 2.24. Secções paralelas equidistantes definidas para as medições.



Figura 2.25. Secções e distâncias ao zero para posterior ajuste.

Definidas as linhas longitudinais ao longo das quais se fariam as medições, escolheram-se depois secções horizontais às quais correspondiam determinados comprimentos de fenda, espaçados em intervalos de 2 a 2.5 mm. Em suma, as extensões foram obtidas numa malha que é representada na Figura 2.26, recorrendo para tal a interpolações de valores mediante uma macro em VBA Excel [Anexo C].

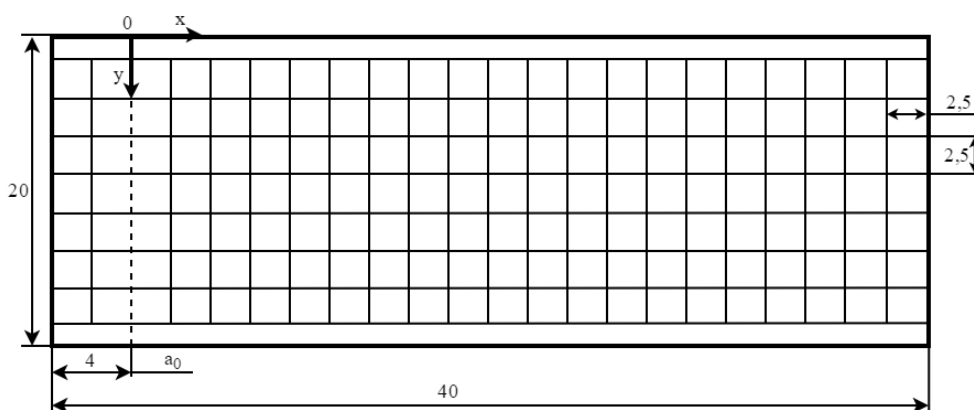


Figura 2.26. Malha de pontos lidos pelo ARAMIS.

Finalmente, após os ensaios, foi necessário combinar as forças e deslocamentos registados na Shimadzu com as medições do ARAMIS. Recorreu-se para tal às escalas de tempos de ambos os sistemas e a interpolações de dados.

Realizaram-se ensaios em 9 provetes, a maior parte dos quais à velocidade de 1 mm/min. Dois provetes ensaiados a 3 mm/min não mostraram diferenças significativas nos valores de G_{IC} . Porém, devido a falhas do sistema ARAMIS, não foi possível efetuar medições fiáveis em todos eles.

3. Resultados Experimentais

A maior parte dos provetes ensaiados teve a rutura coesiva desejável, embora se tenha observado rutura parcialmente adesiva em alguns deles (Figura 3.1). Estes provetes foram excluídos da análise.

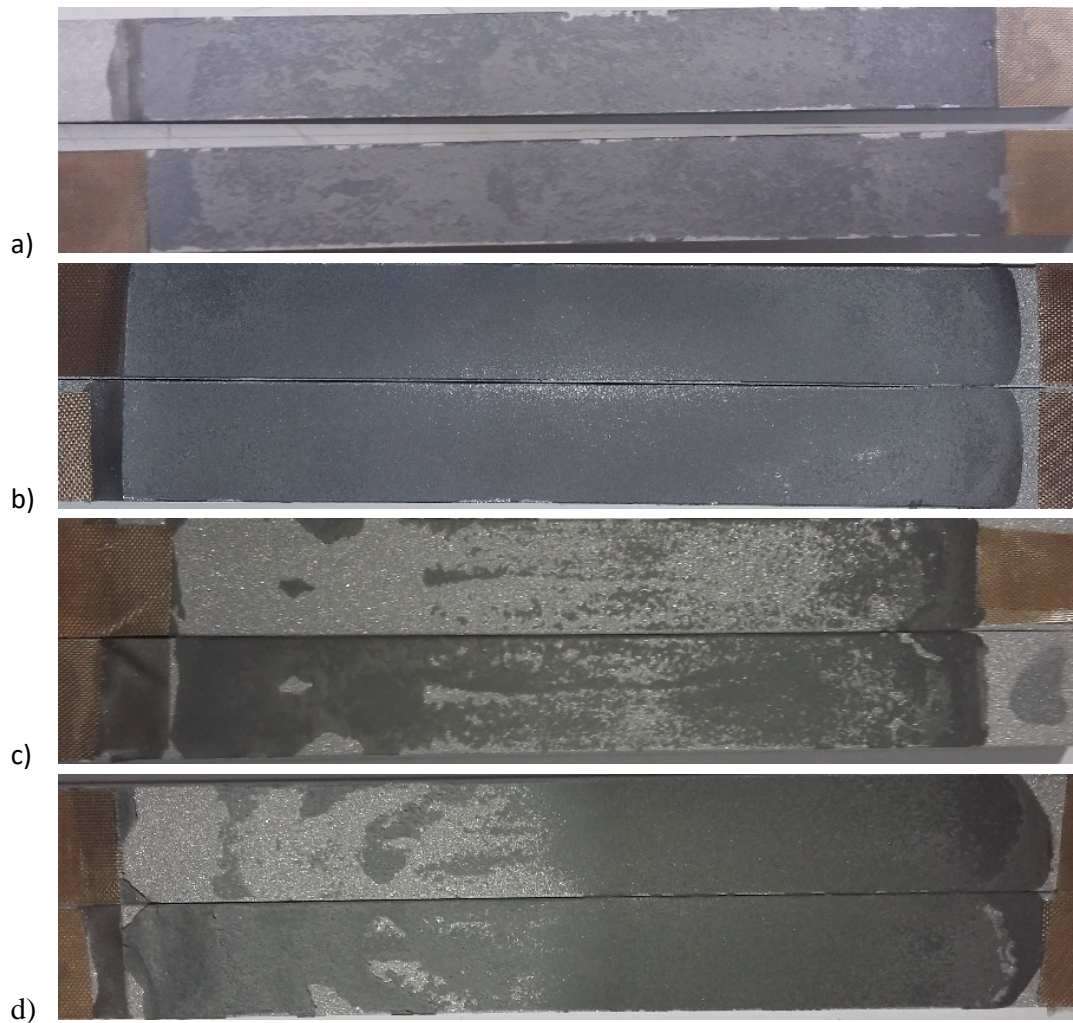


Figura 3.1. Fotografias das superfícies de fratura de alguns provetes ensaiados, exemplificando modos de rutura coesivos (a e b) e adesivos (c e d).

A Figura 3.2 apresenta curvas carga-deslocamento típicas. Notar que os provetes #1 e #2 tiveram rigidez inicial mais elevada devido ao menor comprimento de fenda inicial (60 mm) do que os provetes #3 e #4 (70 mm).

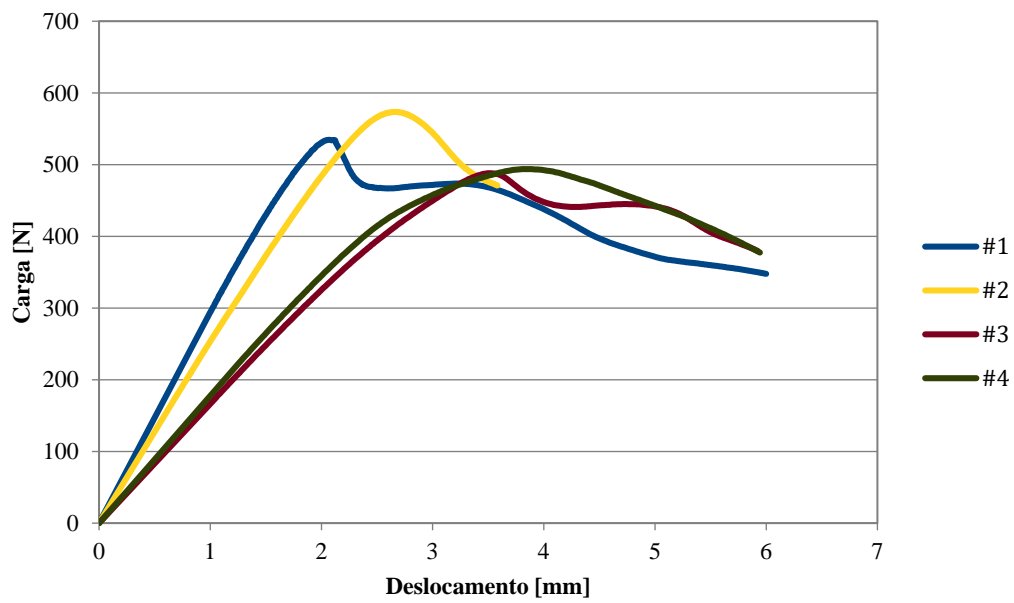


Figura 3.2. Curvas carga-deslocamento de alguns provetes ensaiados.

A Figura 3.3 apresenta curvas R obtidas pelo MFE (ver Capítulo 1.5). Observa-se que o valor de G_{IC} estabilizou entre 1300 e 1600 J/m^2 .

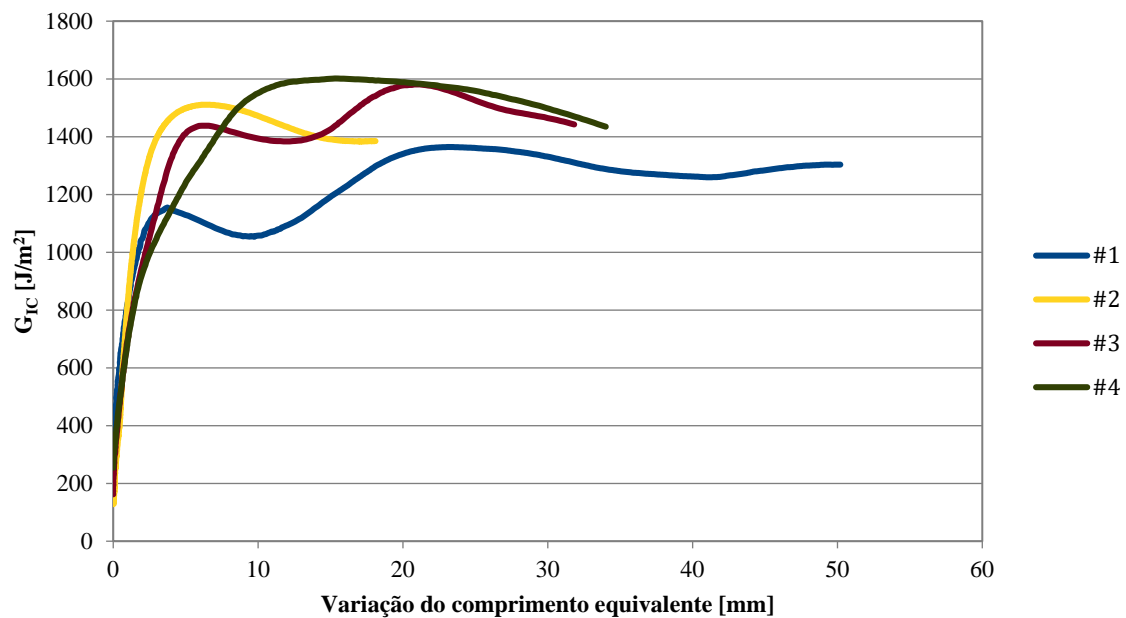


Figura 3.3. Curvas R obtidas pelo MFE para alguns provetes.

No que diz respeito à aplicação da CDI à monitorização do comprimento de fenda, como se exemplifica na Figura 3.4, os resultados mostraram efetivamente a estabilização do fator P/ε_x prevista (ver Capítulo 1.7). Porém, os elevados níveis de ruído dificultaram a identificação rigorosa do ponto de início de patamar, e consequentemente, do instante de passagem da fenda no ponto em questão.

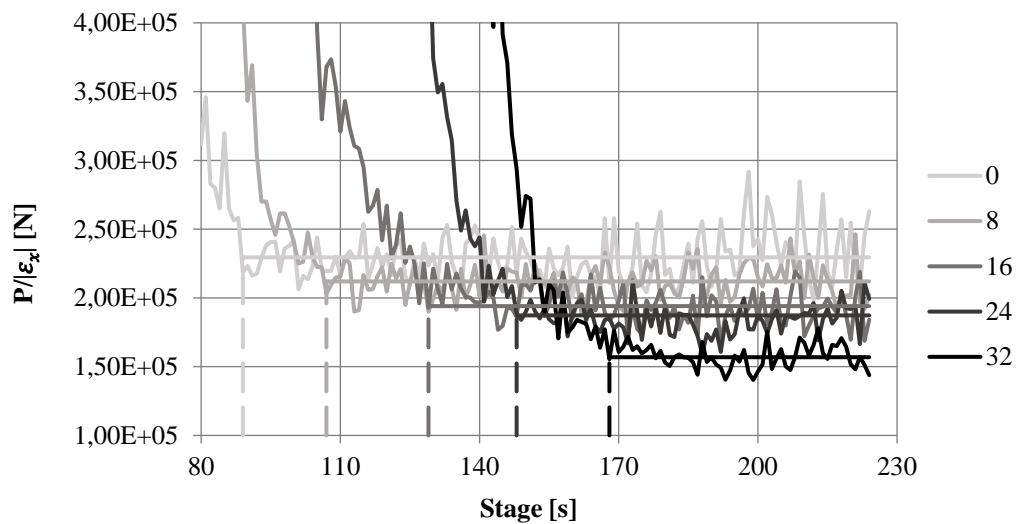


Figura 3.4. Exemplo da evolução do fator P/ε_x ao longo do tempo de ensaio para várias secções distantes de 8 a 32 mm da fenda inicial.

De modo a mitigar o problema do ruído nas medições da CDI, procedeu-se à filtragem do sinal considerando a média de 5 *stages* consecutivos. Definiu-se depois o desvio do fator P/ε_x relativamente ao valor de estabilização (Figura 3.5), e arbitrou-se que o instante de propagação de fenda correspondia ao primeiro *stage* em que o desvio fosse igual ou inferior a 1%. Todos estes cálculos foram feitos automaticamente numa folha Excel padrão através de uma macro VBA [Anexo D].

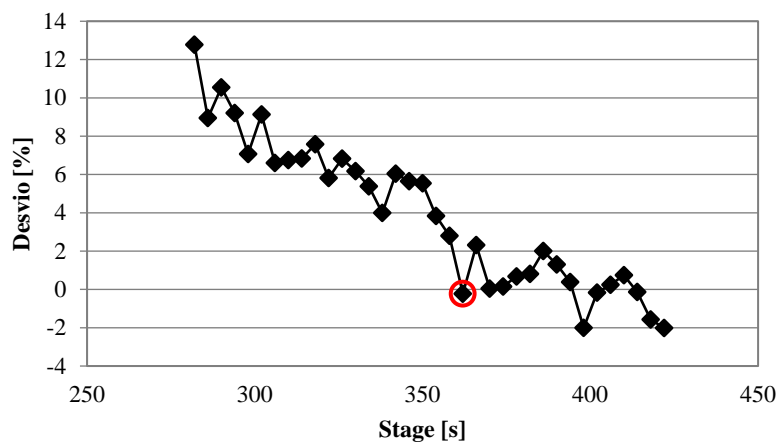


Figura 3.5. Desvio calculado para cada *stage*.

Todavia, nem sempre foi possível obter resultados coerentes em todas as secções longitudinais. A Figura 3.6 mostra a evolução da frente da fenda nas várias secções longitudinais consideradas de dois provetes. Não se consegue ver claramente a tendência para a fenda crescer mais rapidamente no centro do provete do que nos bordos. Isto revela as limitações do método de detecção da frente da fenda, sobretudo nas fases iniciais da propagação, pois a zona de processo de fratura é longa. Não obstante, a frente da fenda pode também ter sido algo irregular.

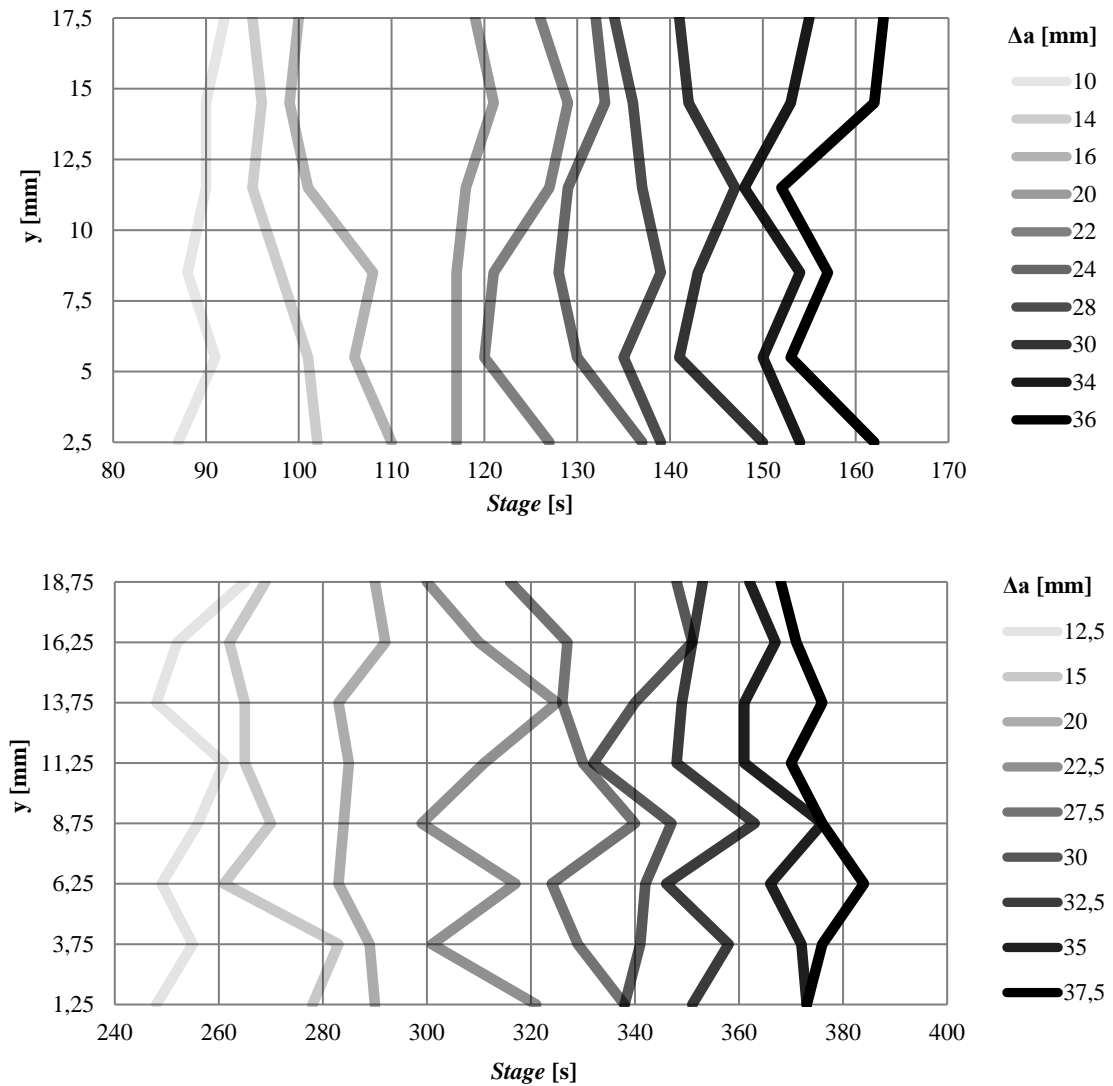


Figura 3.6. Evolução da propagação de fenda obtida da CDI para várias secções longitudinais em dois provetes.

Apesar destas limitações, foi possível obter alguns resultados consistentes com a TVC (Figura 3.7), considerando o comprimento de fenda médio segundo a largura. Por vezes, para obter boa concordância com a TVC foi importante excluir alguns pontos mais próximos da fenda inicial. Isto justifica-se pelo facto dessas zonas serem afetadas pelo desenvolvimento da ZPF mesmo antes da iniciação.

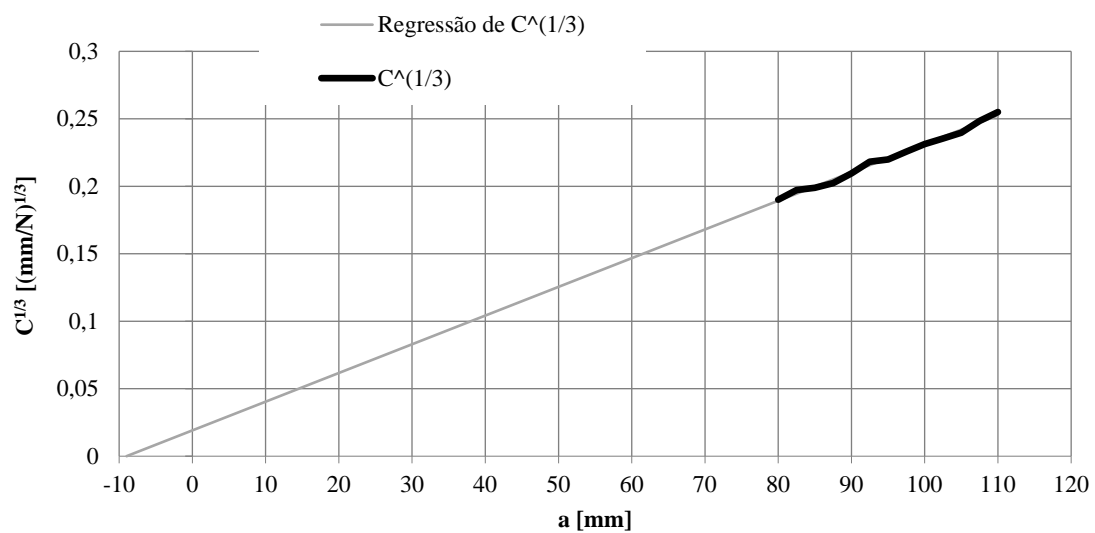
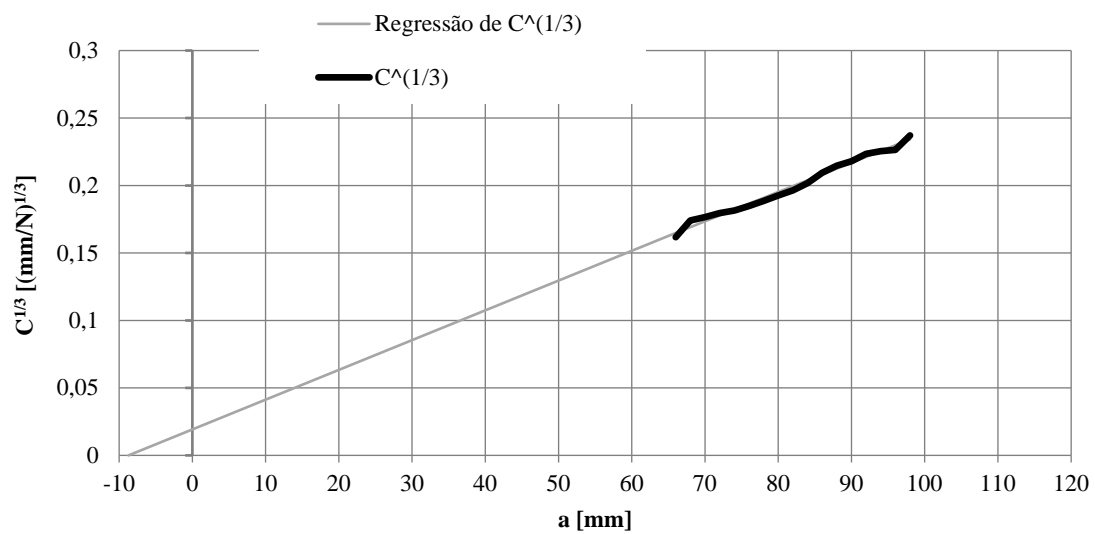


Figura 3.7. Regressões da TVC aplicada a dados de dois provetes.

Os valores do módulo de flexão do aderente estimados pela TVC aproximaram-se dos valores nominais (Figuras 3.8 e 3.9), enquanto que a correção de comprimento de fenda Δ assumiu valores relativamente elevados, típicos de ligações coladas (Figura 3.10).

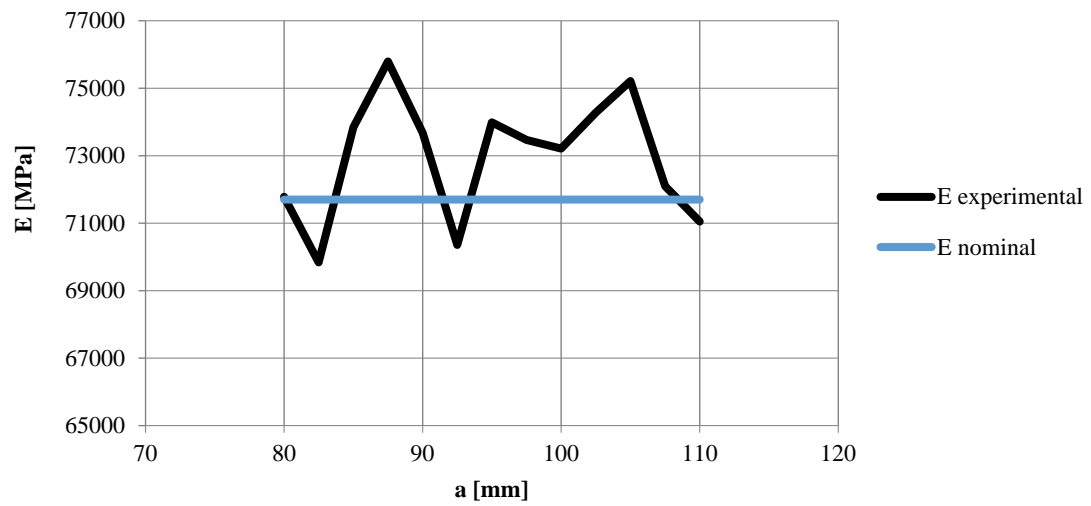
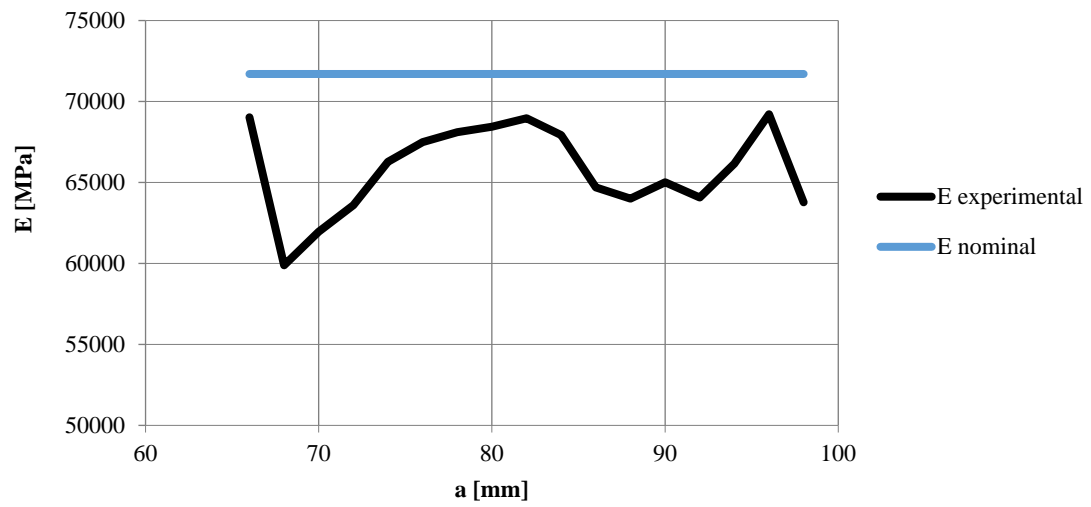


Figura 3.8. Módulo de flexão do aderente calculado pela TVC aplicada a dados de dois provetes, e comparado com o valor nominal.

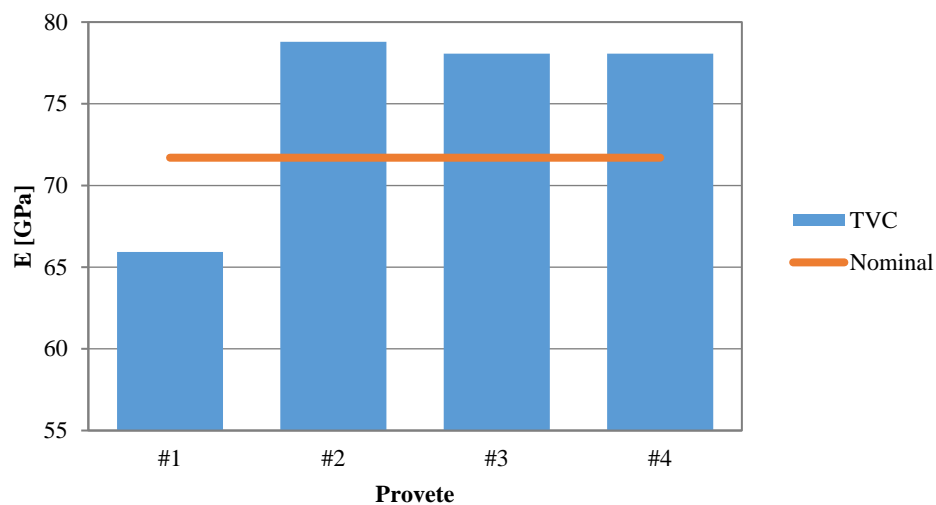


Figura 3.9. Valores médios do módulo de flexão do aderente calculado pela TVC para os provetes com resultados válidos.

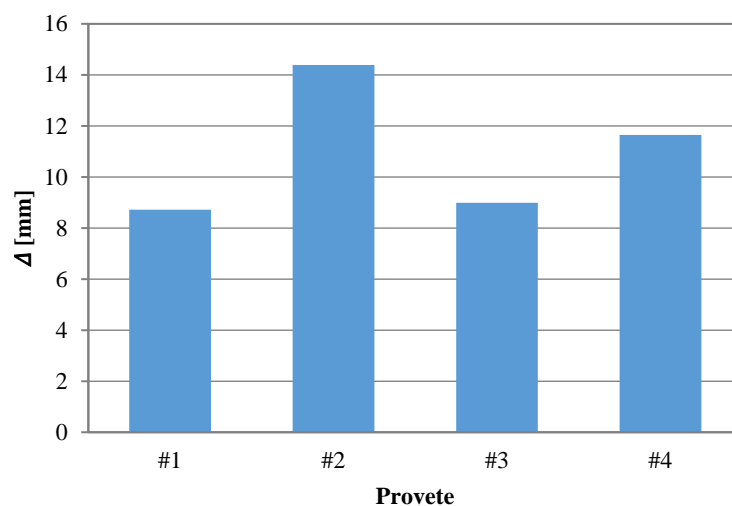


Figura 3.10. Correção de comprimento de fenda da TVC para os provetes com resultados válidos.

Finalmente, compara-se os resultados da TVC com o MFE (Figuras 3.11 e 3.12). Como era expectável, o comprimento de fenda efetivo é sempre superior ao que se obteve da CDI, pois tem em conta o efeito da zona de processo de fratura. Por seu turno, os valores de G_{IC} obtidos pelos dois métodos estiveram em boa concordância.

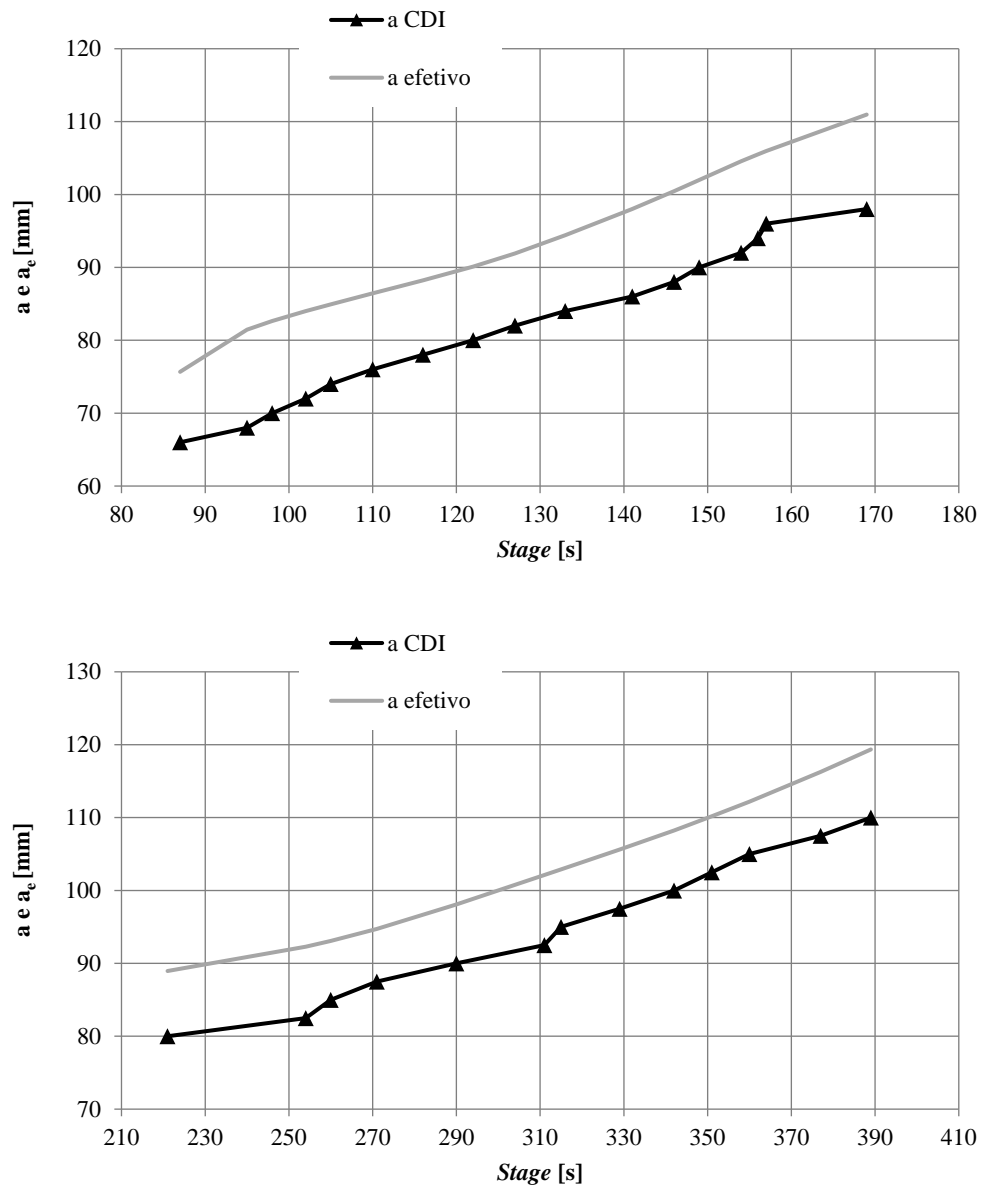


Figura 3.11. Comparação entre o comprimento de fenda obtido pela CDI e o comprimento de fenda efetivo para dois provetes.

De notar que o comprimento de fenda efetivo é superior ao comprimento de fenda obtido pela CDI pois este tem em conta a ZPF, e o valor que nos é dado representa a frente dessa zona.

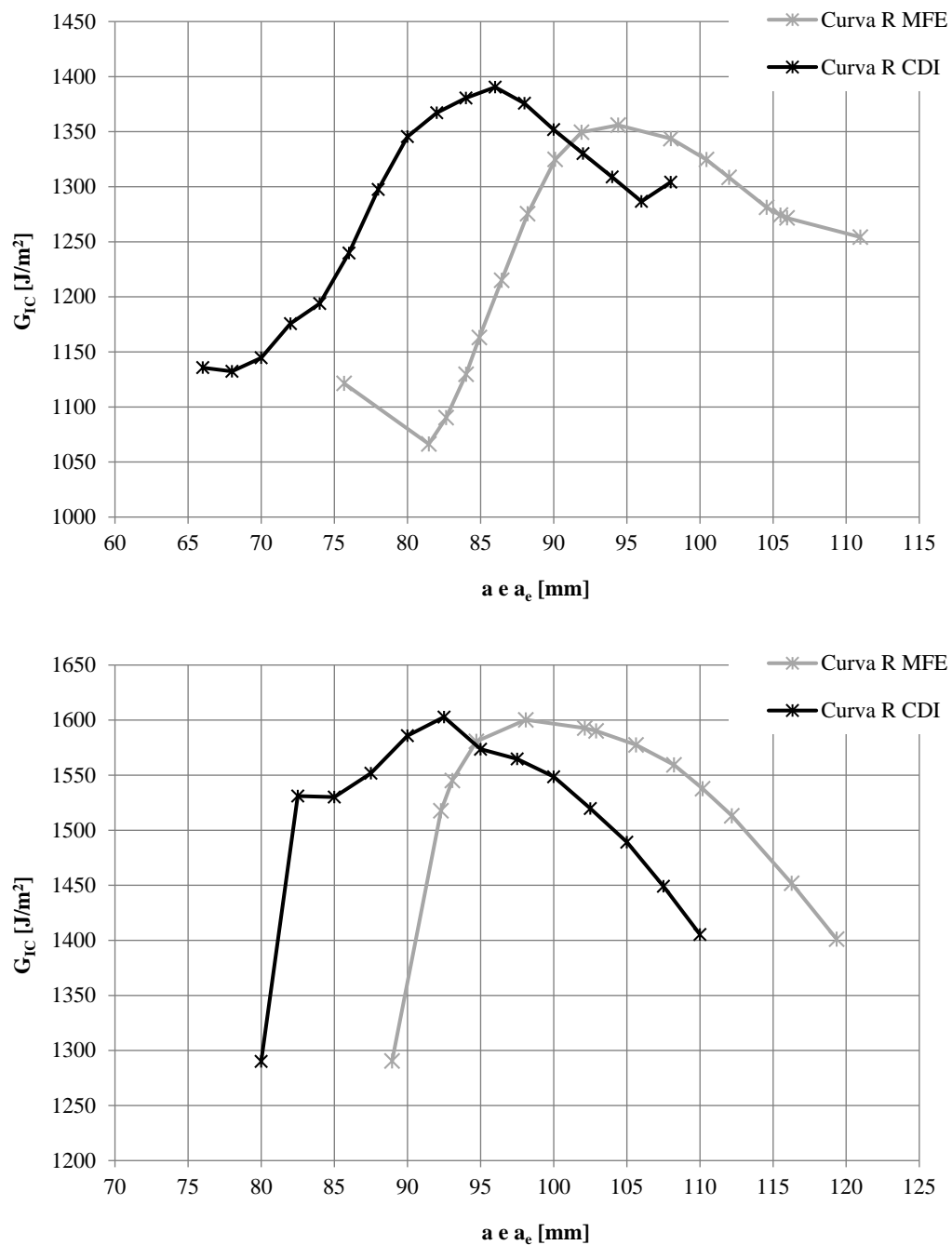


Figura 3.12. Comparação entre as curvas R obtidas pela TVC e pelo MFE para dois provetes.

Da mesma forma que a fenda efetiva se encontra à frente da fenda real, a curva da taxa de libertação de energia também se apresenta deslocada para a frente.

4. Conclusões

Neste trabalho aplicou-se uma nova técnica de monitorização da propagação da fenda a ensaios *Double Cantilever Beam* (DCB) de ligações coladas. A técnica baseia-se na medição das extensões de flexão nos aderentes através da correlação digital de imagem com o sistema ARAMIS. O objetivo principal era acompanhar a propagação da fenda em toda a largura do provete, evitando os erros associados às observações nos bordos.

Esta técnica conduziu a resultados coerentes com os métodos de tratamento de dados bem estabelecidos, nomeadamente a teoria das vigas corrigida e o método da fenda efetiva. Todavia, verificou-se que o ruído nas medições da correlação digital de imagem foi um obstáculo importante à aplicação da técnica proposta, tendo evitado a obtenção de resultados com o rigor pretendido.

Assim, propõe-se estudar em trabalhos futuros algumas formas de reduzir o ruído nas medições:

- Fixar melhor o provete de modo a minimizar movimentos de corpo rígido, como foi feito por Verdade em [76] para ensaios de fadiga;
- Otimizar a calibração do ARAMIS usando um suporte para o calibrador mais sofisticado e rigoroso;

Será também conveniente desenvolver métodos mais expeditos para sincronização dos dados provenientes da máquina de ensaios e do ARAMIS.

Por outro lado, será também importante melhorar a forma de preparação dos provetes no sentido de evitar ruturas adesivas, por exemplo:

- Usar tratamentos químicos das superfícies em adição ao processo de projeção de granalha;
- Utilizar uma máquina de mistura dos dois componentes da cola, melhorando o grau de homogeneidade da mistura.

Referências

- [1] D. L. Potter, “Primary Adhesively Bonded Structure Technology (PABST),” *Des. Handb. Adhes. Bond.*, 1979.
- [2] L. J. Hart-Smith, “Adhesive Bonding of Aircraft Primary Structures,” *High Perform. Adhes. Bond. G. Defray. ed., Soc. Manuf. Eng.*, 1983.
- [3] R. A. Pethrick, “Design and ageing of adhesives for structural adhesive bonding – A review,” *Proc. Inst. Mech. Eng. Part L J. Mater. Des. Appl.*, 2014.
- [4] W. S. Johnson, L. M. Butkis, and R. V. Valentin, “Applications of Fracture Mechanics to the Durability of Bonded Composite Joints,” *Aviat. Res.*, 1998.
- [5] R. J. Schliekelmann, “Past, Present, and Future of Structural Adhesive Bonding in Aero-space Applications,” *Trans. Japanese Soc. Compos. Mater.*, vol. 5, no. 1/2, 1979.
- [6] C. Ciba-Geigy Plastics and Additives, “Ciba-Geigy Technical Notes,” 1977.
- [7] R. F. Blomquist, “Adhesives - Past, Present, and Future,” *Adhes. ASTM STP 360, Am. Soc. Test. Mater.*, 1963.
- [8] J. L. Clarke, *Structural design of polymer composites EUROCOMP design code and handbook*, vol. 35, no. 4. 1996.
- [9] ASTM D5573, “Standard Practice for Classifying Failure Modes in Fiber-Reinforced-Plastic (FRP),” *ASTM Int.*, vol. 15, no. Reapproved 2012, pp. 3–5, 2011.
- [10] L. F. M. da Silva, A. Öchsner, and R. D. Adams, “Handbook of Adhesion Technology,” *Mode I Double Cantilever Beam Test*, pp. 478–483, 2011.
- [11] H. M. Clearfield, D. K. McNamara, and G. D. Davis, “Surface preparation of metals,” *Eng. Mater. Handb.*, vol. 3, 1987.
- [12] M. Davis and D. Bond, “Principles and practices of adhesive bonded structural joints and repairs,” *Int. J. Adhes. Adhes.*, vol. 19, pp. 91–105, 1999.
- [13] A. J. Kinloch, *Adhesion and Adhesives (Science and Technology)*. 2001.
- [14] Plexus, *Guide To Bonding Plastics , Composites and Metals*. Illinois Tool Works Inc.
- [15] “Recent International Journal of Adhesion and Adhesives Articles.” [Online]. Available: <https://www.journals.elsevier.com/international-journal-of-adhesion-and-adhesives/recent-articles>.
- [16] M. Goland and E. Reissner, “Stresses in Cemented Joints,” *J. Appl. Mech.*, 1944.
- [17] L. J. Hart-Smith and E. W. Thrall, “Structural Analysis of Adhesive-Bonded Joints,” *Adhes. Bond. Alum. Alloy. E.W. Thrall R.W. Shannon, eds., Marcel Dekker, Inc.*, 1985.
- [18] A. M. de Bastos Pereira, “Fratura de juntas coladas,” Dissertação de Mestrado

Integrado em Engenharia Mecânica, Universidade de Aveiro, 2002.

- [19] T. L. Anderson, *Fracture mechanics: fundamentals and applications*, 3rd ed. Hoboken: Libgen Librarian, 2005.
- [20] E. J. Ripling, S. Mostovoy, and R. L. Patrick, “Application of Fracture Mechanics to Adhesive Joints,” *Adhes. Am. Soc. Test. Mater. STP 360*, 1963.
- [21] S. J. Shaw, “Adhesive Joint Failure - A Fracture Mechanics Approach,” *Adhes. 7 Proc. 20th Annu. Conf. Adhes. Adhes.*, 1983.
- [22] ASTM D3433, “Annual Book of ASTM standards,” *Adhes. Sect. 15*, 1990.
- [23] ASTM Standard D3433-99, “Standard Test Method for Fracture Strength in Cleavage of Adhesives in Bonded Metal Joints,” *ASTM Int.*, vol. 99, no. Reapproved, pp. 1–8, 2012.
- [24] S. Mostovoy, P. B. Crosley, and E. J. Ripling, “Use of crack-line loaded specimens for measuring plane-strain fracture toughness,” *J. Mater.*, vol. 2(3), 1967.
- [25] J. G. Williams, “Large displacement and end block effects in the DCB interlaminar test in modes I & II,” *J. Compos. Mater.*, pp. 21–330, 1987.
- [26] B. R. K. Blackman, A. J. Kinloch, M. Paraschi, and W. S. Teo, “Measuring the mode I adhesive fracture energy, GIC, of structural adhesive joints: The results of an international round-robin,” *Int. J. Adhes. Adhes.*, vol. 23, no. 4, pp. 293–305, 2003.
- [27] J. P. Berry, “Some kinetic considerations of the Griffith criterion of fracture-I: Equations of motion at constant deformation,” *J. Mech. Phys. Solids*, vol. 16, pp. 8–207, 1960.
- [28] J. A. Harris and R. D. Adams, “Strenght prediction of bonded single-lap joints by nonlinear finite element methods,” *Int. J. Adhes. Adhes.*, vol. 4, pp. 65–78, 1984.
- [29] A. Towse, R. G. H. Davies, A. Clarke, M. R. Wisnom, R. D. Adams, and K. D. Potter, “The design and analysis of high load intensity adhesively bonded double lap joints,” *Int. Conf. Deform. Fract. Compos.*, no. 479–488, 1997.
- [30] J. M. Whitney and R. J. Nuismer, “Sress Fracture Criteria for Laminated Composites,” *J. Compos. Mater.*, vol. 8, pp. 253–265, 1974.
- [31] D. S. Dugdale, “Yielding steel sheets containing slits,” *J. Mech. Phys. Solids*, vol. 8, no. 2, pp. 100–104, 1960.
- [32] G. I. Barenblatt, “Mathematical theory of equilibrium cracks in brittle fracture,” *Adv. Appl. Mech.*, vol. 7, pp. 55–129, 1962.
- [33] S. Kumar and S. V Barai, *Concrete Fracture Models and Applications*. Springer, 2011.
- [34] L. F. M. da Silva and R. D. S. G. Campilho, *Advances in numerical modeling of adhesive joints*. 2012.
- [35] T. Andersson and U. Stigh, “The stress-elongation relation for an adhesive layer loaded in peel using equilibrium of energetic forces,” *Int. J. Solids Struct.*, vol. 41,

- no. 2, pp. 413–434, 2004.
- [36] M. Alfano, F. Furguele, A. Leonardi, C. Maletta, and G. H. Paulino, “Mode I fracture of adhesive joints using tailored cohesive zone models,” *Int. J. Fract.*, vol. 157, no. 1–2, pp. 193–204, 2009.
 - [37] D. Álvarez, B. R. K. Blackman, F. J. Guild, and A. J. Kinloch, “Mode I fracture in adhesively-bonded joints: A mesh-size independent modelling approach using cohesive elements,” *Eng. Fract. Mech.*, vol. 115, pp. 73–95, 2014.
 - [38] A. B. De Morais, “Analysis of the metal adhesively bonded double cantilever beam specimen,” *Int. J. Adhes. Adhes.*, vol. 61, pp. 8–14, 2015.
 - [39] N. Ben Salem, J. Jumel, M. K. Budzik, M. E. R. Shanahan, and F. Lavelle, “Analytical and experimental investigations of crack propagation in adhesively bonded joints with the Mixed Mode Bending (MMB) test Part II: Investigation of cohesive stresses distribution with backface strain monitoring,” *Theor. Appl. Fract. Mech.*, vol. 74, no. 1, pp. 222–232, 2014.
 - [40] R. D. S. G. Campilho, D. C. Moura, M. D. Banea, and L. F. M. Da Silva, “Adhesive thickness effects of a ductile adhesive by optical measurement techniques,” *Int. J. Adhes. Adhes.*, vol. 57, pp. 125–132, 2015.
 - [41] T. Carlberger and U. Stigh, “Influence of Layer Thickness on Cohesive Properties of an Epoxy-Based Adhesive—An Experimental Study,” *J. Adhes.*, vol. 86, no. April 2015, pp. 816–835, 2010.
 - [42] C. J. Constante, R. D. S. G. Campilho, and D. C. Moura, “Tensile fracture characterization of adhesive joints by standard and optical techniques,” *Eng. Fract. Mech.*, vol. 136, pp. 292–304, 2015.
 - [43] G. F. Dias, M. F. S. F. de Moura, J. A. G. Chousal, and J. Xavier, “Cohesive laws of composite bonded joints under mode I loading,” *Compos. Struct.*, vol. 106, pp. 646–652, 2013.
 - [44] J. Han and T. Siegmund, “Cohesive Zone Model Characterization of the Adhesive Hysol EA-9394,” *J. Adhes. Sci. Technol.*, vol. 26, no. June 2014, pp. 1033–1052, 2012.
 - [45] G. Ji, Z. Ouyang, and G. Li, “Effects of bondline thickness on Mode-I nonlinear interfacial fracture of laminated composites: An experimental study,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 47, pp. 1–7, 2013.
 - [46] G. Ji, Z. Ouyang, G. Li, S. Ibekwe, and S. S. Pang, “Effects of adhesive thickness on global and local mode-I interfacial fracture of bonded joints,” *Int. J. Solids Struct.*, vol. 47, no. 18–19, pp. 2445–2458, 2010.
 - [47] J. Jumel, N. Ben Salem, M. K. Budzik, and M. E. R. Shanahan, “Measurement of interface cohesive stresses and strains evolutions with combined mixed mode crack propagation test and Backface Strain Monitoring measurements,” *Int. J. Solids Struct.*, vol. 52, pp. 33–44, 2015.
 - [48] M. F. S. F. De Moura, J. P. M. Gonçalves, and A. G. Magalhães, “A straightforward method to obtain the cohesive laws of bonded joints under mode i loading,” *Int. J.*

Adhes. Adhes., vol. 39, pp. 54–59, 2012.

- [49] T. Walander, A. Biel, and U. Stigh, “Temperature dependence of cohesive laws for an epoxy adhesive in Mode I and Mode II loading,” *Int. J. Fract.*, vol. 183, no. 2, pp. 203–221, 2013.
- [50] Q. Sheet, T. Of, and C. Listing, “Analysis of the cohesive zone and crack length correction in the adhesively bonded double cantilever beam specimen Analysis of the cohesive zone and crack length correction in the adhesively bonded double cantilever beam specimen,” vol. 0, pp. 0–16.
- [51] Z. Zhang and G. H. Paulino, “Cohesive zone modeling of dynamic failure in homogeneous and functionally graded materials,” *Int. J. Plast.*, vol. 21, no. 6, pp. 1195–1254, 2005.
- [52] C. D. M. Liljedahl, A. D. Crocombe, M. A. Wahab, and I. A. Ashcroft, “Damage modelling of adhesively bonded joints,” *Int. J. Fract.*, vol. 141, no. 1, pp. 147–161, 2006.
- [53] X.-P. Xu, “Numerical simulations of fast crack growth in brittle solids,” *J. Mech. Phys. Solids*, vol. 42, no. 9, pp. 1397–1434, 1994.
- [54] F. J. P. Chaves, L. F. M. da Silva, M. F. S. F. de Moura, D. D.A., and V. H. C. Esteves, “Fracture mechanics tests in adhesively bonded joints: a literature review,” *J. Adhes.*, vol. 90, pp. 995–992, 2014.
- [55] S. Timoshenko and D. H. Young, *Theory of Structures*. 1965.
- [56] M. A. Sutton, W. J. Wolters, W. H. Peters, W. F. Ranson, and S. R. McNeil, “Determination of Displacements Using an Improved Digital Correlation Method,” *Image Vis. Comput.*, vol. 1, pp. 133–139, 1983.
- [57] M. A. Sutton, M. Q. Cheng, W. H. Peters, Y. J. Chao, and S. . McNeill, “Application of an Optimized Digital Correlation Method to Planar Deformation Analysis,” *Image Vis. Comput.*, vol. 4, pp. 143–151, 1986.
- [58] M. A. Sutton, J. L. Turner, H. A. Bruck, and T. A. Chae, “Full-field Representation of Discretely Sampled Surface Deformation for Displacement and Strain Analysis,” *Exp. Mech.*, vol. 31, pp. 168–177, 1991.
- [59] H. A. Bruck, S. R. McNeil, M. A. Sutton, and W. H. Peters, “Digital Image Correlation Using Newton-Raphson Method of Partial Differential Correction,” *Exp. Mech.*, vol. 29, pp. 261–267, 1989.
- [60] T. C. Chu, W. F. Ranson, and M. A. Sutton, “Applications of digital-image-correlation techniques to experimental mechanics,” *Exp. Mech.*, vol. 25, pp. 232–244, 1985.
- [61] S. Mguil-Touchal, F. Morestin, and M. Brunet, “Various Experimental Applications of Digital Image Correlation Method,” *Comput. Methods Exp. Meas.*, pp. 45–58, 1997.
- [62] J. Chen, X. Zhang, N. Zhan, and X. Hu, “Deformation measurement across crack using two-step extended digital image correlation method,” *Opt. Lasers Eng.*, vol. 48,

- pp. 1126–1131, 2010.
- [63] J. R. Yates, M. Zanganeh, and Y. H. Tai, “Quantifying crack tip displacement fields with DIC,” *Eng. Fract. Mech.*, vol. 77, pp. 2063–2076, 2010.
 - [64] J. Xavier, M. Oliveira, J. J. L. Morais, and M. F. S. F. de Moura, “Determining mode I cohesive law of Pinus pinaster by coupling double cantilever beam test with digital image correlation,” *Frat. ed Integrita Strutt.*, vol. 31, pp. 13–22, 2015.
 - [65] A. Makeev, G. Seon, J. Cline, and B. Shonkwiler, “In quest of methods for measuring 3D mechanical properties of composites,” *Compos. Sci. Technol.*, vol. 100, pp. 105–112, 2014.
 - [66] J. Ribeiro, M. Vaz, H. Lopes, F. Q. De Melo, and J. Monteiro, “Assessment of the Displacement Field Along a Surface Crack in a Flat Plate Using Optical Techniques,” *Exp. Tech.*, vol. 39, no. 5, pp. 10–20, 2015.
 - [67] J. M. Monteiro, M. A. P. Vaz, F. Q. Melo, and J. F. S. Gomes, “Use of Interferometric Techniques for Measuring the Displacement Field in the Plane of a Part-Through Crack Existing in a Plate,” *Int. J. Press. Vessel. Pip.*, vol. 78, no. 4, pp. 253–259, 2001.
 - [68] J. S. Epsteina, H. Y. Junga, and W. G. Reuterb, “Stress Intensity Factor Extraction Using Moir ´e Interferometry Based on a Two-Parameter Displacement Eigen Function: Validity Criteria and Comparison with ASTM E-399 KIC Plane Strain Test Methods,” *Opt. Lasers Eng.*, vol. 13, no. 2, pp. 167–180, 1990.
 - [69] S. Dhara, G. Clouda, and S. Paleebuta, “Measurement of Three Dimensional Mode-I Stress Intensity Factor Using Multiple Embedded Grid Moire Technique,” *Theor. Appl. Fract. Mech.*, vol. 12, no. 2, pp. 141–147, 1989.
 - [70] GOM Optical Measuring Technologies, “User Manual - Hardware,” *ARAMIS*, 2009.
 - [71] GOM Optical Measuring Technologies, “User Manual - Software,” *ARAMIS*, 2009.
 - [72] ASM Aerospace Specification Metals Inc., “MA7075T6 @ asm.matweb.com.” .
 - [73] 3M, “Scotch-Weld Epoxy Adhesive 2216 B/A,” *Tech. Data*, 2009.
 - [74] ABNT, “Especificações geométricas do produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil - Termos, definições e parâmetros da rugosidade,” *NBR ISO 4287*, p. 18, 2002.
 - [75] F. J. Domingues, “Ensaaios biaxiais em polipropileno,” Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica, Universidade de Aveiro, 2016.
 - [76] J. F. S. Verdade, “Comportamento à fadiga em modo I usando o ensaio Double Cantilever Beam modificado,” Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica, Universidade de Aveiro, 2016.
 - [77] M. J. Troughton, *Handbook of Plastics Joining. A Practical Guide*, 2nd ed. William Andrew Inc., 2008.

Anexo A.

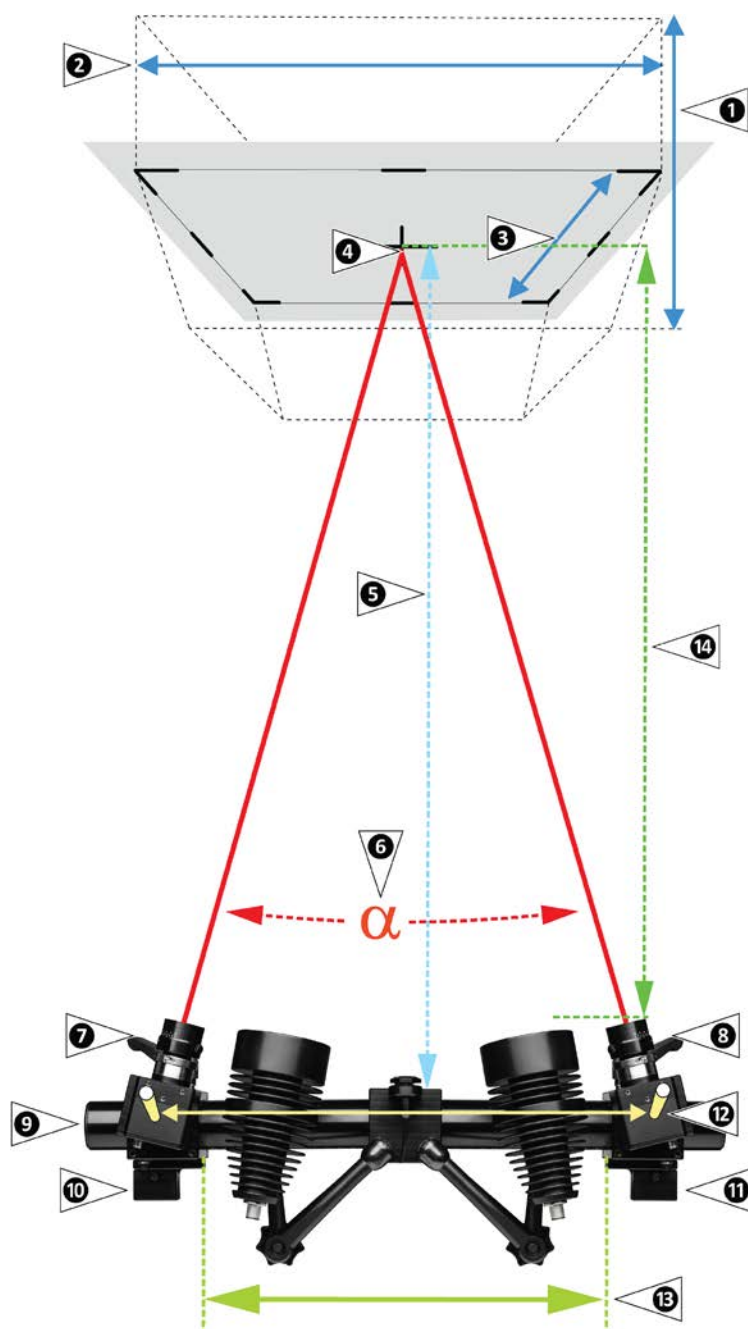
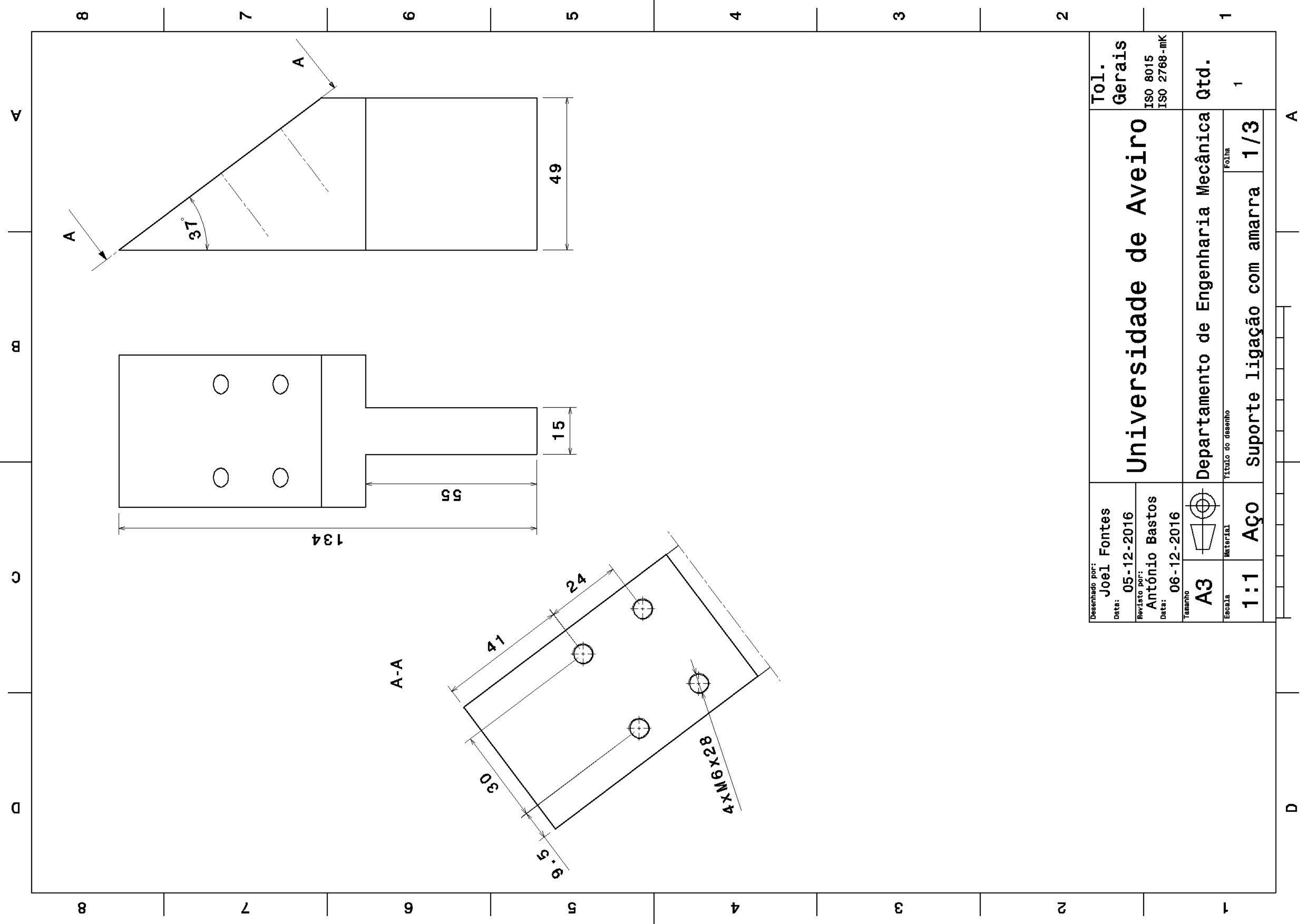
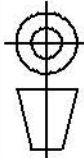


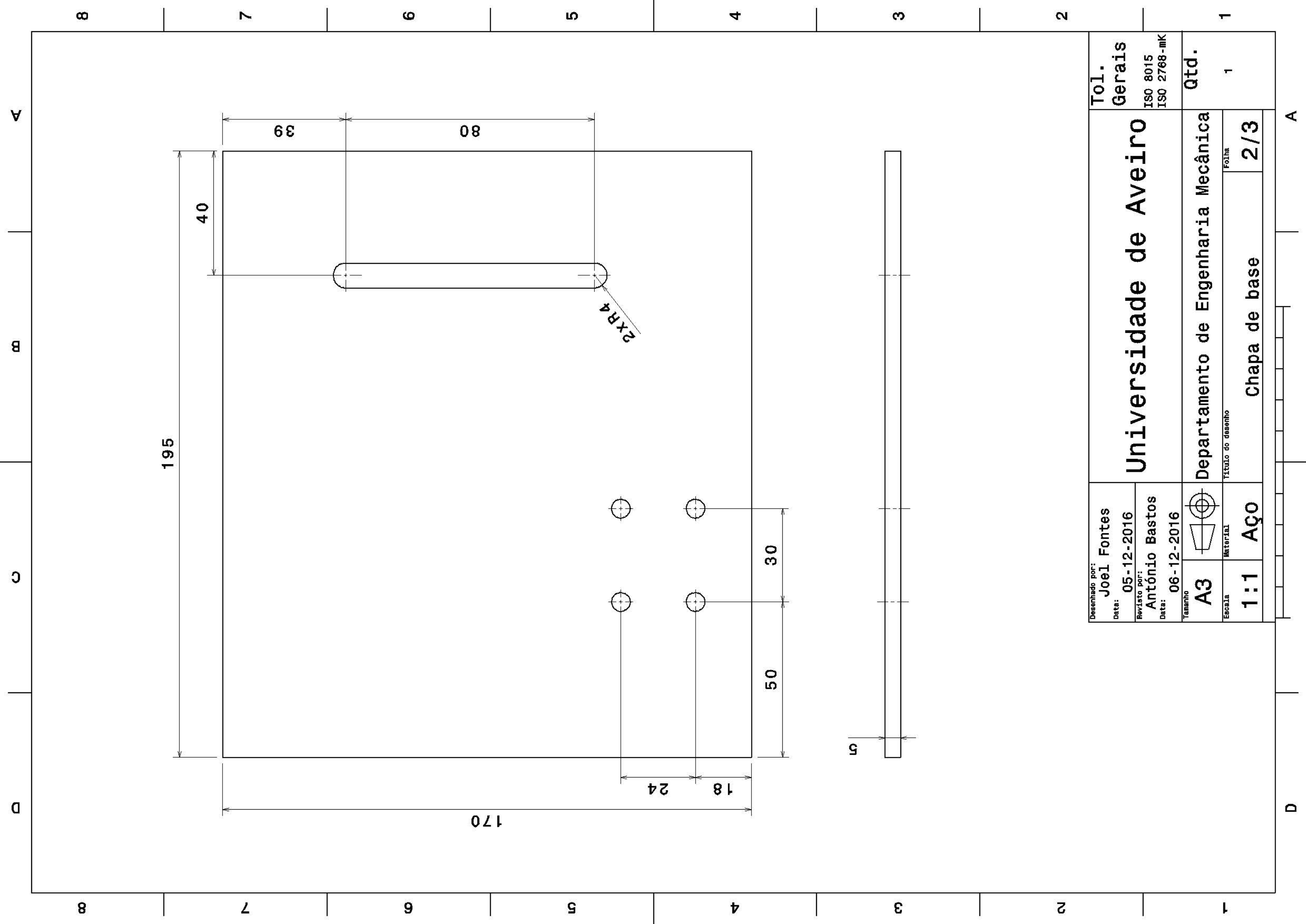
Figura 1. Unidade do sensor 3D na vista superior.

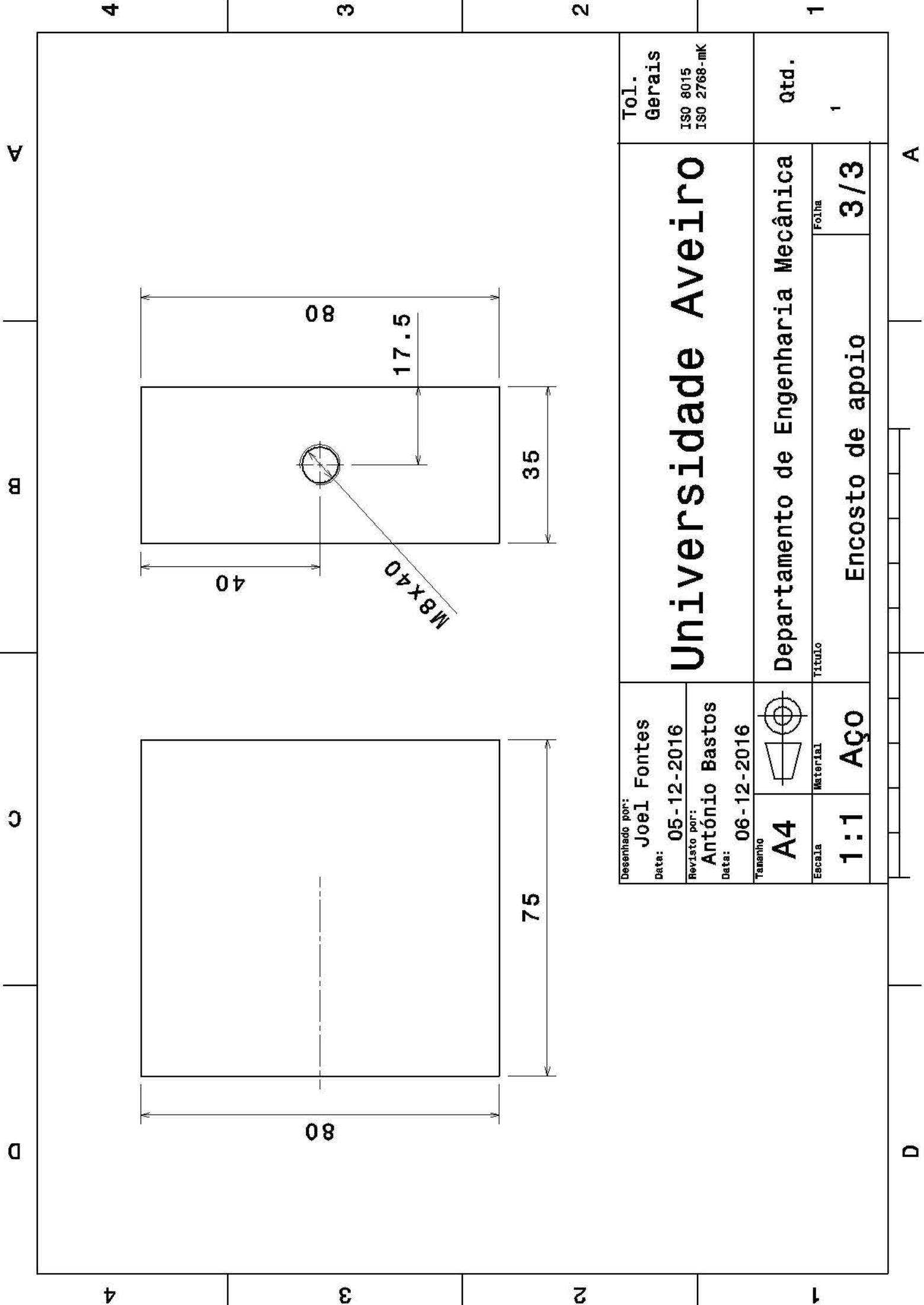
- | | | | |
|---|-----------------------------------|----|----------------------------|
| 1 | Altura H (volume de medição) | 7 | Lente da câmera esquerda L |
| 2 | Comprimento L (volume de medição) | 8 | Lente da câmera direita R |
| 3 | Largura W (volume de medição) | 9 | Suporte da câmera |
| 4 | Centro do volume de medição | 10 | Slider esquerdo |
| 5 | Distância de medição | 11 | Slider direito |
| 6 | Ângulo da câmera | 12 | Distância da base |
| | | 13 | Distância do slider |
| | | 14 | Largura interna |

Anexo B.



Desenhado por: Joel Fontes		Universidade de Aveiro		Tol. Gerais ISO 8015 ISO 2768-mK	
Data: 05-12-2016	Revisão por: António Bastos				
Data: 06-12-2016					
Tamanho A3		Departamento de Engenharia Mecânica		Qt. 1	
Escala 1 : 1	Material Aço	Título do desenho Suporte ligação com amarra			
		Folha 1 / 3			





Anexo C.


```

Sub organize_data()

'Definir pasta em que os ficheiros estao guardados
basedados = "D:\Desktop\ensaios antigos\novos dados\report_sectionY_data\"
start_stage = Range("K2")
end_stage = Range("L2")

For sec_ = 0 To 7

    'define a distancia da secção ja registada na folha de excel
    d_ = Cells(2, sec_ + 2)
    Range("O2") = sec_

    'pinta a verde uma celula onde esta o nome da secção
    With Cells(2, sec_ + 2).Interior
        .ColorIndex = 4
        .Pattern = xlSolid
        .PatternColorIndex = xlAutomatic
    End With

    lin = 4
    For st_ = start_stage To end_stage
        Range("K2") = st_
        Cells(lin, 1) = st_
        'definir nome do ficheiro extrapolado pelo ARAMIS
        file = "section_stage_section" & sec_ & "_0-" & st_ & ".txt"

        Workbooks.OpenText Filename:= _
            basedados + file _
            , Origin:=xlMSDOS, StartRow:=1, DataType:=xlDelimited, TextQualifier:= _
            xlDoubleQuote, ConsecutiveDelimiter:=True, Tab:=True, Semicolon:=True, _
            Comma:=True, Space:=True, Other:=False, FieldInfo:=Array(Array(1, 1), _
            Array(2, 1), Array(3, 1), Array(4, 1), Array(5, 1)), DecimalSeparator:= ".", _
            ThousandsSeparator:= " ", TrailingMinusNumbers:=True
        lastrow = ActiveSheet.Cells.Find("*", searchorder:=xlByRows, searchdirection:=xlPrevious).Row

        'acerta coordenadas dos pontos da secção
        Range("A7").FormulaLocal = "=B7-" & d
        Range("A7").AutoFill Destination:=Range("A7:A" & lastrow)
        col = 2

        For x = -4 To 38 Step 2
            'Insere formulas no livro excel para o calculo da interpolação
            Range("K4") = "X1"
            Range("K5").FormulaLocal = "=MÁXIMO.SE.S(A5:A131;A5:A131;" & "<" & x & """"")"
            Range("L4") = "Y1"
            Range("L5").FormulaLocal = "=ÍNDICE(C5:C131;CORRESP(K$5;A5:A131;0))"
            Range("K6") = "X2"
            Range("K7").FormulaLocal = "=MÍNIMO.SE.S(A7:A133;A7:A133;" & ">" & x & """"")"
            Range("L6") = "Y2"
            Range("L7").FormulaLocal = "=ÍNDICE(C7:C133;CORRESP(K$7;A7:A133;0))"

            'Interpolar
            Range("L9") = "Y"
            Range("L10").FormulaLocal = "=L$5+(( " & x & "-K$5)/(K$7-K$5))*(L$7-L$5)"

            'Guardar valor
            Workbooks("Livro1.xlsx").Worksheets("Folha1").Cells(lin, col) = Range("L10")
            col = col + 1
        Next

        'fecha ficheiro do stage actual
        ActiveWorkbook.Close savechanges:=False
        lin = lin + 1
    Next

    'Guarda ficheiro com os dados interpolados para o stage em questão
    Workbooks("Livro1.xlsx").SaveAs Filename:= _
        "D:\Desktop\ANÁLISE\" & "Secção" & sec_ & "_Ensaio0.xlsx", FileFormat:= _
        xlOpenXMLWorkbook, CreateBackup:=False
    ActiveWorkbook.Close

    'Abre o ficheiro padrão para analisar um novo stage
    Workbooks.Open Filename:="D:\Desktop\ANÁLISE\Livro1.xlsx"

Next

End Sub

```


Anexo D.


```

Sub analize()

'COPIA DADOS PARA CALCULO

For ens_ = 1 To 5
    'abre o ficheiro padrao correspondente ao ensaio em questao
    Workbooks.Open Filename:= _
    "D:\Desktop\ANÁLISE\frente_da_fenda\Ensaio " & ens_ & "\Prov_" & ens_ & "_base.xlsx"

    For sec_ = 0 To 7
        'abre o ficheiro onde estao guardados os dados necessarios para a analise
        Workbooks.Open Filename:="D:\Desktop\ANÁLISE\Secção" & sec_ & "_Ensaio" & ens_ & ".xlsx"

        For x = -2.5 To 40 Step 2.5
            'percorre todos os pontos da secção e cola os dados necessarios na folha de analise
            folha = "x=" & x
            Workbooks("Secção" & sec_ & "_Ensaio" & ens_ & ".xlsx").Worksheets("Folha1").Activate
            Range(Cells(4, x / 2.5 + 3), Cells(800, x / 2.5 + 3)).Copy _
            Workbooks("Prov_" & ens_ & "_base.xlsx").Worksheets(folha).Cells(4, 2 + sec_)
        Next
        'fecha o workbook desta secção e avança para a proxima
        Workbooks("Secção" & sec_ & "_Ensaio" & ens_ & ".xlsx").Close
    Next
Next

'GRAVAR A POSIÇÃO DA FENDA DE TODOS OS PONTOS NUM UNICO FICHEIRO

'definir linha do ficheiro excel onde esta a fenda
prov = 120

For ens_ = 1 To 5
    'abre o ficheiro onde vai ser gravada a posição da fenda em cada ponto
    Workbooks.Open Filename:= _
    "D:\Desktop\ANÁLISE\frente_da_fenda\Ensaio " & ens_ & "\frente_E" & ens_ & ".xlsx"

    For sec_ = 0 To 7
        Workbooks.Open Filename:= _
        "D:\Desktop\ANÁLISE\frente_da_fenda\Ensaio " & ens_ & "\Prov" & ens_ & "_sec" & sec_ & "_base.xlsx"
        For xpos = 0 To 40 Step 2.5

            folha = "x=" & xpos
            fenda = Worksheets(folha).Cells(prov, 21).Value
            'Se a fenda foi encontrada pinta a celula de excel do stage onde ela esta
            ' se nao foi entao passa um valor em branco para gravar no ficheiro
            If IsNumeric(fenda) = True Then
                With Worksheets(folha).Cells(fenda + 4, 20).Interior
                    .ColorIndex = 4
                    .Pattern = xlSolid
                    .PatternColorIndex = xlAutomatic
                End With
            Else
                fenda = ""
            End If
            'grava a posição da fenda no ficheiro para o tal e na posição correspondente
            Workbooks("frente_E" & ens_ & ".xlsx").Worksheets("Folha1").Cells(2 + sec_, 2 + xpos / 2.5) = fenda
        Next
        Workbooks("Prov" & ens_ & "_sec" & sec_ & "_base.xlsx").Close savechanges:=True
    Next
Next

End Sub

```

